

Amplificadores de RF usando Valvulas

October 18, 2021

1 Introducción

Actualmente las válvulas o tubos electrónicos son consideradas como piezas de museo y ya no se utilizan. Efectivamente, los tipos de válvulas para manejo de señales a potencias pequeñas que se utilizaron extensamente fueron remplazadas por transistores y otros dispositivos de estado sólido, y han dejado de usarse y, aunque vuelven a utilizarse en algunos casos aislados como ciertos amplificadores de sonido, o algunas aplicaciones.

En sistemas de comunicaciones, cierto tipo de válvulas continúan empleándose ampliamente, sin que se vislumbre un futuro cercano en que puedan ser substituidas por componentes de estado sólido.

Entre ellas, los tubos de onda progresiva (TWT) en los amplificadores de los transpondedores de la mayoría de los satélites, los magnetrones utilizados extensamente en radares y los diversos tipos de tubos amplificadores de potencia en los transmisores de radio y televisión. En los terrenos científico, industrial y médico las válvulas electrónicas se emplean, por ejemplo, en aceleradores de partículas, sistemas de calentamiento industrial y aparatos de rayos X. Por ello, es conveniente dedicar, aunque sólo sea de forma descriptiva y relativamente superficial, un breve tiempo al estudio de las válvulas amplificadoras de potencia.

1.1 Las valvulas

Las válvulas son dispositivos electrostáticos que utilizan el flujo de electrones, la base de todo el flujo de corriente eléctrica. En un material, la cantidad de electrones depende del elemento atómico: el hidrógeno tiene un solo electrón, mientras que los metales tienen muchos más electrones en órbita. Los electrones son móviles y pueden intercambiar libremente órbitas con sus átomos vecinos. Cuando un electrón cambia de órbita, deja una deficiencia en ese átomo en particular. Durante un breve período, el átomo está cargado positivamente hasta que un electrón equilibra la carga.

Los materiales metálicos tienen electrones flotando muy cerca de la superficie, como una fina niebla. Pueden ser atraídos fácilmente por un objeto suficientemente cargado positivamente. A temperatura ambiente, los electrones son un poco lentos y no tienen la capacidad de saltar lejos del metal principal. Sin embargo, a medida que el metal se calienta se vuelve más activo. Cuando la temperatura es lo suficientemente alta, los electrones tienen mucha energía y pueden imaginarse como una espesa niebla flotando sobre el metal principal. Algunos materiales muy especiales emiten una gran cantidad de electrones incluso a temperatura ambiente. Estos se utilizaron para hacer válvulas especiales, llamadas válvulas de cátodo frío, pero hoy estos son raros.

Esto en términos simples es lo que constituye un cátodo, es una fuente de “electrones libres”. Si un objeto cargado positivamente se acerca ahora al metal, los electrones libres fluirán al objeto. Los metales puros no son la mejor fuente de electrones libres, a menos que la temperatura sea muy

alta. Sin embargo, hay algunos otros materiales que liberan electrones con mucha más facilidad, como materiales de tierras raras, como bario, torio y estroncio. Si el metal está recubierto con estos óxidos, la generación de electrones libres aumenta dramáticamente.

El objeto cargado positivamente se llama ánodo y también es un material metálico. Si se aplica un voltaje externo entre el ánodo y el cátodo, podemos hacer que los electrones fluyan entre ellos, incluso en el vacío.

Si la distancia entre el electrón y el cuerpo con carga positiva es grande, la fuerza de atracción es pequeña. A medida que el electrón comienza a moverse hacia el cuerpo cargado positivamente, inicialmente viaja lentamente, luego, a medida que se reduce la distancia, la fuerza de atracción aumenta. En poco tiempo viajan a una velocidad cercana a la de la luz, típicamente el 70%.

Cuando el electrón llega al ánodo, dada la aceleración del campo eléctrico, tiene energía cinética. Aunque el electrón tiene una masa muy baja, gracias a esta energía, cuando golpea la superficie del ánodo, cede la energía cinética que ha acumulado al acelerar. Esto desaloja otros electrones, que ya están en la superficie. Los electrones desplazados, aunque ahora son catapultados al espacio sobre el ánodo, son fuertemente atraídos porque están muy cerca del ánodo y regresan al ánodo en un período muy corto. Este desplazamiento de electrones debido a una colisión se llama emisión secundaria.

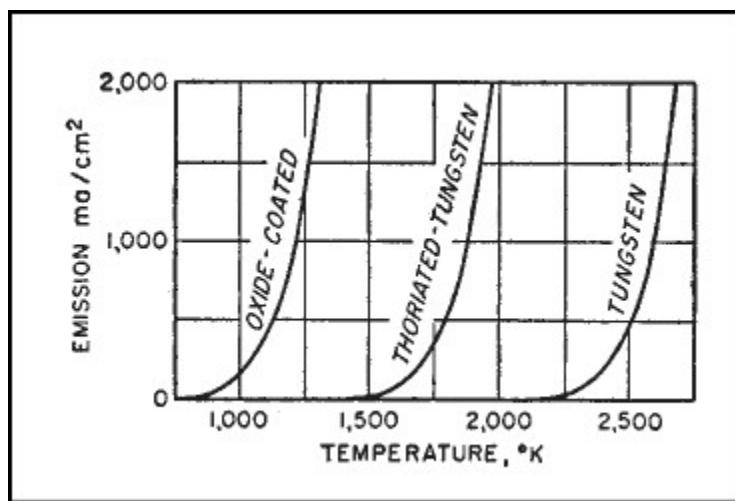


Fig 1: Gráfico de emisiones de cátodos.

La temperatura del cátodo se mide en la escala de Kelvin. El tungsteno tiene la emisión más baja a baja temperatura. Para emitir suficientes electrones, debe calentarse a una temperatura muy alta. El cátodo recubierto de óxido necesita la temperatura más baja y el cátodo de tungsteno toriado se encuentra entre estos otros dos tipos. El torio es un metal de tierras raras que se usa comúnmente como recubrimiento de alambre de tungsteno.

Para una emisión máxima de un cátodo recubierto de óxido, la temperatura es de aproximadamente $1350K$; el cátodo de tungsteno toriado es de aproximadamente $1900K$. Los cátodos de tungsteno son cables desnudos y deben estar a $2700 K$ para obtener la mejor emisión. El blanco brillante es de unos $3300 K$. El tungsteno es el material del que están hechas las lámparas eléctricas y un cátodo de tungsteno funciona a una temperatura similar. En terminología de válvulas, se clasifican como "emisores brillantes".

Podemos ver en la tabla que un cátodo recubierto de óxido puede suministrar $\sim 2A/cm^2$. Se trata del límite superior con la tecnología moderna.

La nube de electrones en la superficie del cátodo da lugar a otra terminología que se utiliza. La nube de electrones libres se conoce como “nube espacial”. A medida que el ánodo atrae algunos de los electrones lejos de la nube, surgen reemplazos del cátodo de modo que en cualquier momento hay un número relativamente constante esperando ser transportado al ánodo. Si la tasa de producción de electrones libres no es suficiente, no se puede alcanzar la corriente máxima del ánodo. La corriente de electrones que se mueve entre el cátodo y el ánodo se denomina “carga espacial”.

1.2 Tipos de valvulas

1.2.1 Diodo

Hoy en día, los diodos semiconductores utilizan la misma terminología de denominación, ánodo y cátodo; es un retroceso a la era de las válvulas. Las válvulas se podían quitar fácilmente ya que los pines de la base se enchufaron en el equipo. Por lo tanto, es rápido y fácil reemplazar una válvula defectuosa. Los pines están polarizados para que la válvula solo pueda encajar si los pines están alineados correctamente con los enchufes.

1.2.2 Válvula de triodo

En el triodo, el ánodo y el cátodo son similares al tipo de diodo simple. El electrodo adicional se coloca cerca del cátodo, mientras que el ánodo está a una distancia similar a la del tipo de diodo. Este nuevo electrodo se llama rejilla porque usa una rejilla de alambres finos para formar una pantalla entre el cátodo y el ánodo. Aunque la rejilla tiene aberturas muy pequeñas, en comparación con un electrón, son agujeros abiertos. Por tanto, los electrones tienen poca dificultad para encontrar su camino entre el cátodo y el ánodo.

La forma común de construcción es utilizar tubos cilíndricos concéntricos. El cátodo es el tubo más pequeño. Alrededor de esta se encuentra la rejilla de control, enrollada como una bobina helicoidal o una serie de rejillas de malla enrolladas en un tubo hueco. El ánodo es el tubo exterior, que forma el soporte, mediante pasadores rígidos y aisladores de mica, para mantener los diferentes cilindros en la alineación correcta.

La rejilla de control permite controlar el flujo de electrones desde el cátodo al ánodo. En un triodo permite controlar el flujo de electrones variando el voltaje que se le aplica. Los electrones, al ser partículas con carga negativa, repelen cualquier otro objeto con carga negativa. Al aplicar un voltaje negativo suficientemente alto a la rejilla, los electrones en la nube espacial son repelidos. Cuando la red no tiene una carga tan negativa, algunos de los electrones pueden pasar a través de la red porque el alto voltaje positivo en el ánodo los atrae. Si el voltaje del ánodo aumenta y se vuelve más positivo, la atracción también aumenta y más electrones pasarán a través de la red. Por lo tanto, aumentar el voltaje del ánodo también crea un mayor flujo de corriente.

Si la tensión de la red se eleva para igualar la del cátodo, la diferencia de tensión cae a cero. Se comporta como si la cuadrícula se hubiera eliminado por completo. En este estado fluirá la máxima corriente de ánodo. Si la tensión de la red aumenta de modo que se vuelva positiva con respecto al cátodo, se aplica otro estado.

Los electrones buscan un lugar con carga positiva adonde ir. Importa poco si es el ánodo o algún otro objeto cargado positivamente. Con la rejilla ahora muy positiva, y estando mucho más cerca

del cátodo que del ánodo, algunos de los electrones aterrizarán en la rejilla de la misma manera que aterrizarán en el ánodo. Esto significa que la amplitud del flujo del ánodo comienza a disminuir a medida que pasa una gran cantidad de electrones a la estructura de rejilla positiva. Si la rejilla es suficientemente positiva, reduce el flujo de corriente del ánodo a un nivel muy bajo. La corriente que ahora fluye en la red hace que se caliente ya que los cables muy finos tienen una alta resistencia. Esto puede provocar daños si se permite que sea demasiado alto.

Entre la condición de potencial de cuadrícula positiva muy alta y solo una condición débilmente positiva, entra en juego otro factor. Los electrones que salen del cátodo son atraídos inicialmente por el potencial anódico muy alto. Mientras viajan hacia él, también experimentan la atracción de la rejilla de control débilmente positiva. Esta atracción adicional acelera a los electrones. Cuando los electrones llegan a la red, ya están viajando casi a su máxima velocidad. Vuelan y, a medida que se alejan de la red, ahora viajando hacia el ánodo, experimentan cada vez menos atracción por el potencial positivo débil de la red y más y más por el ánodo. La pequeña carga positiva, si no es demasiado alta, actúa como un acelerador inicial de los electrones. Por encima de esta condición débil, la rejilla atraerá más y más electrones hasta que el ánodo se quede sin electrones. Por lo tanto, cuando la red está unos pocos voltios por encima de cero, la corriente del ánodo aumenta antes de caer.

El esquema en el diseño de válvulas es maximizar la aceleración de los electrones y minimizar el número que son detenidos por la red. Por supuesto, algunos electrones siempre no pasarán a través de la estructura de rejilla fina, simplemente porque chocan con ella. Siempre que el número de impactos en la red sea pequeño, no se produce ningún daño. Al igual que con el ánodo, cuando un electrón choca contra un objeto estático, provoca calor al ceder la energía cinética que contiene. Por lo tanto, siempre existirá una corriente de red muy pequeña, aunque la red no esté cargada positivamente. La amplitud de esta corriente es tan baja que apenas se puede medir. En el caso de que el voltaje de la red sea negativo, pero no lo suficiente para cortar completamente la corriente del ánodo, los electrones se doblan alrededor de los cables cargados y los evitan.

A la derecha se muestra una estructura de cuadrícula típica. Esto es de un pequeño triodo de microondas (2C39A, <https://frank.pocnet.net/sheets/140/2/2C39A.pdf>), la rejilla es del tipo clásico de cable cruzado y el espacio entre el cátodo es de solo $\sim 0,25mm$. El espaciado del ánodo está a $\sim 1,2mm$ de la rejilla, por lo que la trayectoria de vuelo de los electrones es muy corta. La porción del ánodo de la válvula se ha roto para ver el interior de la válvula. El sobre de vidrio es un simple tubo redondo.

Los cables de la rejilla tienen un diámetro de aproximadamente $0,01mm$ y la abertura entre los cables es de aproximadamente $0,05mm$. El objeto oscuro en el centro es la superficie del cátodo. Los cables de la rejilla se tensan y se sueldan por puntos al exterior en forma de arandela que se conecta al contacto de la rejilla.

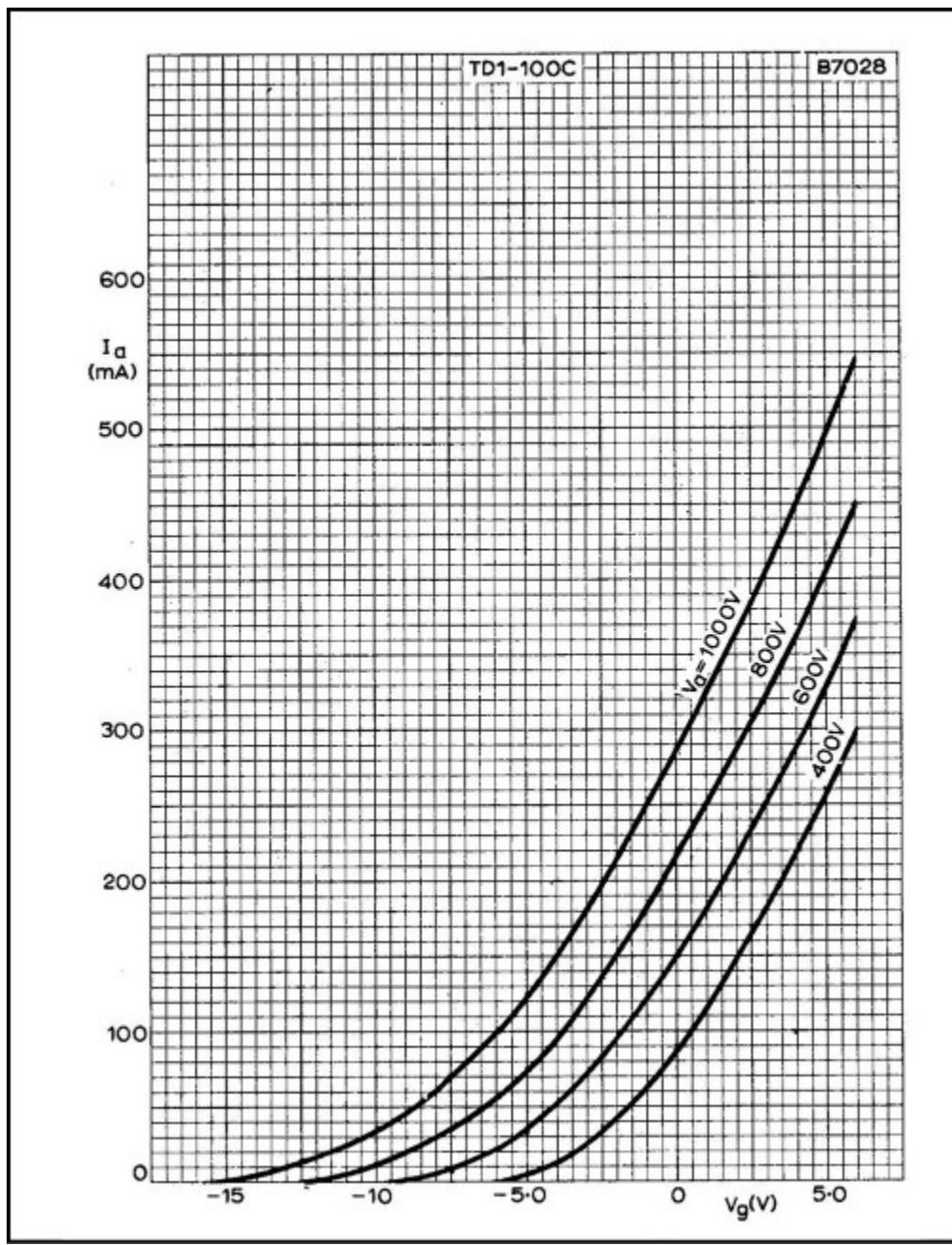


Fig 2.3: Curvas de corriente de ánodo de triodo (del Manual técnico de Mullard, Libro 2 Parte 4, 'Válvulas y tubos', 1969).

La curva de corriente del ánodo de un triodo transmisor pequeño típico se muestra en la Fig . 2.3 . En este gráfico hay dos ejes principales, uno es el voltaje de la red (eje X) y el otro es la corriente del ánodo (eje Y). Las diversas líneas son el resultado de diferentes voltajes de polarización de cátodo de rejilla a diferentes voltajes de ánodo. Este conjunto de curvas es para el triodo 2C39BA fabricado por Mullard con su número de pieza TD1-100C.

El eje vertical muestra el valor de la corriente del ánodo en mA. El eje horizontal muestra la rejilla al voltaje del cátodo. Cada una de las cuatro curvas corresponde a diferentes voltajes de ánodo.

Este tipo es la curva de corriente de ánodo más simple. Los detalles más completos se encuentran en un capítulo posterior, donde analizaremos otros tipos de curvas en detalle y cómo se utilizan.

A partir del gráfico, podemos establecer que el flujo de corriente del ánodo está directamente relacionado tanto con el voltaje del ánodo como con el voltaje de la red. Si se examina la curva de corriente del ánodo de 400V, para llevar la corriente del ánodo a cero se requiere un voltaje de rejilla-cátodo de -6V. Para encontrar qué corriente del ánodo fluye para otros voltajes de la red cuando el voltaje del ánodo es de 400V, podemos elegir otro punto en la curva de 400V. Supongamos que elegimos 100mA y dejamos caer una línea vertical hacia abajo para intersecar el eje horizontal y leemos la escala para encontrar el voltaje de red requerido, que es +0.5V. De manera similar, podemos establecer cualquier otra corriente de ánodo frente a la tensión de la red utilizando la tabla. Para impulsar la válvula hasta 400mA cuando el voltaje del ánodo es de 1000V, encontramos que debe ser de +2,6V. Para cortar la corriente del ánodo para este voltaje del ánodo se requieren -16V.

Notará que las curvas son realmente curvas, no líneas rectas. Esto se debe a que, en la mayoría de las válvulas, las características de transferencia están distorsionadas a corrientes muy bajas y muy altas. Las únicas partes rectas de las curvas están por encima de una cierta corriente de ánodo mínima y por debajo de una corriente de ánodo máxima. La curva de corriente del ánodo superior en este gráfico no sube lo suficiente para ver la curva a una corriente de ánodo muy alta. A una corriente de ánodo muy alta, la limitación del flujo de corriente de ánodo es simplemente la capacidad del cátodo para producir suficientes electrones. Cuando el cátodo no puede entregar suficientes electrones, la curva de corriente del ánodo se aplana.

1.2.3 Válvula Tetrode

La siguiente válvula comúnmente utilizada incluye otro electrodo adicional y, dado que ahora tiene cuatro electrodos, se llama tetrodo.

La válvula de triodo se puede mejorar y el tetrode fue el siguiente paso lógico. En el triodo, cuando los electrones chocan contra el ánodo, tienden a desprender otros electrones y provocar una emisión secundaria. Estos electrones desplazados causan una “confusión” del flujo total de electrones entre el cátodo y el ánodo y pueden ser perjudiciales para la operación. Si se coloca otra estructura de rejilla cerca del ánodo y se carga positivamente a un voltaje muy por debajo del potencial del ánodo, detendrá los electrones de emisión secundaria y ayudará a limpiar el flujo total. Esta nueva estructura de cuadrícula se llama cuadrícula de pantalla o Grid-2. Barre los electrones de emisión secundaria errantes y los desvía del ánodo de vuelta a la fuente de alimentación.

Al hacerlo, existe una pequeña corriente adicional en la nueva estructura de rejilla. En funcionamiento normal, esta corriente es bastante pequeña. Sin embargo, si el voltaje del ánodo se reduce hacia el potencial de la rejilla de la pantalla, este último comienza a actuar como otro ánodo. Si el voltaje del ánodo cae para ser igual al voltaje de la rejilla de la pantalla, entonces ahora tenemos dos ‘ánodos’ polarizados de manera similar que luchan por los electrones en tránsito. Por lo tanto, el voltaje de la rejilla de la pantalla nunca debe ser tan alto como el ánodo o, por el contrario, el voltaje del ánodo nunca debe caer por debajo del voltaje de la rejilla de la pantalla.

Sin embargo, existen excepciones válidas a esta regla. Si la rejilla de la pantalla y el ánodo están conectados, la válvula tetrode se convierte en un triodo simple. Esto a veces se hace por varias razones que se tratarán más adelante.

Una de las acciones de la cuadrícula de la pantalla no es solo detener los electrones errantes, sino

también comportarse de la misma manera que una cuadrícula de control ligeramente positiva. Provoca un empuje adicional a los electrones que viajan entre el cátodo y el ánodo para dar luego una pequeña aceleración adicional en la parte final de la trayectoria de vuelo. El resultado de esto es que, no solo la rejilla de control tiene un mayor control sobre la cantidad de electrones liberados para volar hacia el ánodo, sino que ahora también la rejilla de la pantalla tiene el mismo efecto. Actúa como una red de control subsidiaria. Cuando los dos actúan al unísono, el resultado es que aumenta el flujo de electrones. Por lo tanto, la válvula de tetrodo de rejilla de pantalla tiene un mayor flujo de corriente que un triodo de tamaño similar. Esto significa que para una cierta variación del voltaje de la red de control hay un cambio mayor en el flujo de corriente del ánodo. Es aproximadamente de tres a cinco veces mayor que una válvula de triodo de tamaño similar.

Sin embargo, el tetrodo también tiene cierto inconveniente. Al ser una estructura adicional colocada entre la rejilla de control y el ánodo, la rejilla de la pantalla también puede experimentar efectos de emisión secundaria, porque algunos de los electrones de alta velocidad pueden impactar y hacer que haya más electrones de emisión secundaria presentes. Para corregir este problema se utiliza otra estructura de cuadrícula. Por lo tanto, ahora tenemos una válvula con tres estructuras de rejilla, el pentodo.

1.2.4 Válvula de pentodo

El pentodo introduce la cuadrícula final y esta se llama cuadrícula supresora o cuadrícula-3. Esta rejilla se coloca entre la rejilla de la pantalla (Rejilla-2) y el ánodo, pero está conectada al cátodo. Esta es una conexión interna o una que el usuario tiene que conectar en los pines de la base de la válvula.

Al estar en el potencial del cátodo, los electrones lo ven como otra estructura con el mismo potencial que ellos. Por lo tanto, tratan de evitarlo y prefieren refugiarse en un lugar más positivo. Este refugio seguro los está esperando; es la cuadrícula de la pantalla. Entonces, la rejilla supresora suprime los electrones secundarios errantes del ánodo y los obliga a refugiarse en la rejilla de la pantalla.

De los dos tipos de válvulas de rejilla de pantalla, el tetrodo y el pentodo son ambos muy similares en características. Muchas y variadas son las diferentes técnicas de construcción interna utilizadas, pero todas funcionan de la misma manera.

Tanto los pentodos como los tetrodos tienen mayores ganancias de corriente que los triodos. En determinadas aplicaciones es preferible utilizar un pentodo y en otras un tetrodo. Las características de tetrodo y pentodo también se pueden adaptar para adaptarse a diferentes aplicaciones cambiando el tamaño, el espaciado o la forma de las estructuras de rejilla para satisfacer requisitos especiales.

1.2.5 Construcción de filamento de cátodo

Se utilizan varias estructuras de cátodo diferentes. Algunos son alambres de tungsteno lisos, a menudo recubiertos de óxido, y sirven como calentador y cátodo combinados. Estos tipos se utilizan comúnmente en válvulas rectificadoras grandes y algunos triodos de RF y se conocen como cátodos calentados directamente. Otros tipos usan un filamento calefactor dentro de un tubo, que está recubierto por fuera con un óxido. Estos tipos se conocen como cátodos calentados indirectamente (Fig. 2.5). Muchas válvulas pequeñas de recepción y transmisión utilizan el cátodo calentado indirectamente: simplifican el diseño pero tienen una ruptura de voltaje finita en voltajes de calentador a cátodo altos. El cátodo calentado directamente no tiene este problema, pero

dificulta el diseño del equipo.

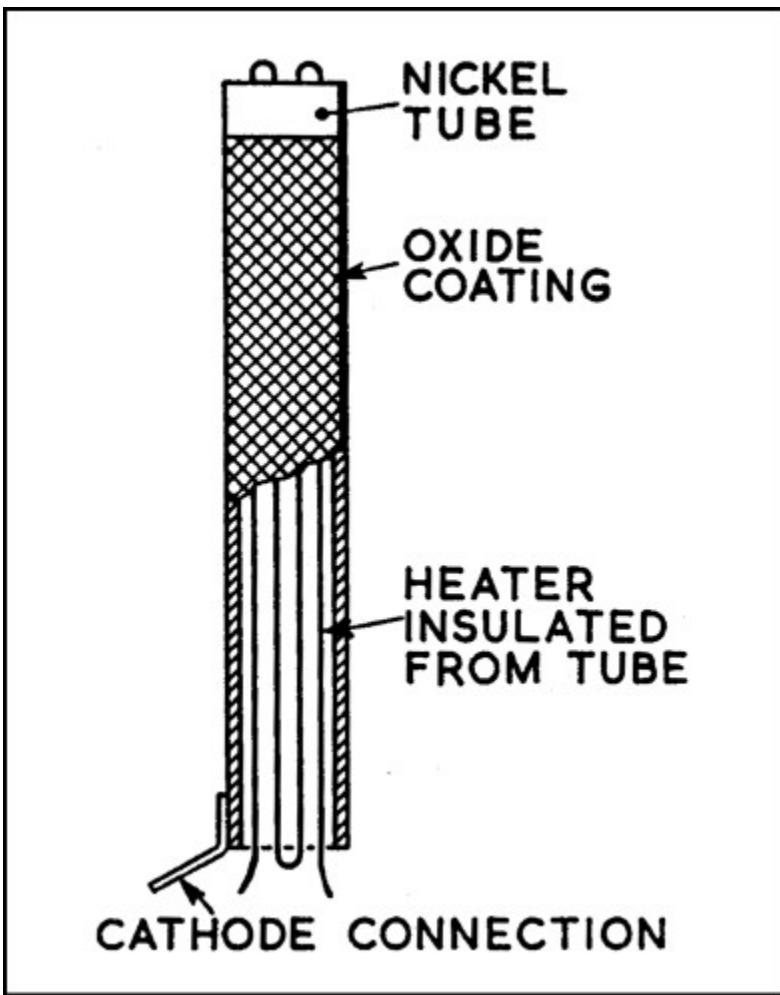


Fig 2.5: Construcción de cátodo calentado indirectamente.

Generalmente, todos los calentadores de cátodo requieren un suministro de filamento de CA o CC. En válvulas de transmisión grandes, la energía consumida por el filamento puede ser bastante alta. El triodo Eimac 3-500Z, por ejemplo, requiere un suministro de filamento de 5 V de 14,5 A para cada válvula. Si el amplificador tiene dos válvulas, el suministro de filamento debe suministrar casi 30A.

El método más común para suministrar el filamento es un devanado de baja tensión en el transformador de red. Si el equipo utiliza diferentes voltajes de filamento, se requiere un devanado para cada tipo diferente. Los receptores pequeños y las válvulas de transmisión de baja potencia a menudo utilizan 6,3 V o 12,6 V, por lo que se adaptan al funcionamiento de la radio móvil con una batería de coche de 12 V. Otros tipos tienen filamentos de doble voltaje. Suelen ser dos filamentos conectados en serie con una clavija central. Estos pueden utilizar 6,3 V o 12,6 V cableando los pines de la base en consecuencia.

En la numeración de válvulas estadounidense, a menudo, el primer número indica el voltaje del filamento, por ejemplo, una 6SA7 y una 12SA7 son la misma válvula, excepto que una tiene un filamento de 6,3 V y la otra un filamento de 12,6 V. Para los receptores de televisión y radio, a menudo, todas las válvulas tienen la misma corriente de filamento, por ejemplo 300 mA, y pueden

conectarse en serie y alimentarse desde la red de CA con una resistencia cuentagotas adecuada en serie.

1.2.6 Construcción de encapsulado

La gran mayoría de válvulas más pequeñas utilizan un tipo de encapsulado de vidrio. Algunos encapsulados de vidrio son una mezcla de vidrio de cuarzo, que resiste mejor las altas temperaturas. Otros tipos usan lo que parece ser una envoltura de metal, pero la mayoría de estas válvulas más pequeñas son simplemente una envoltura de vidrio normal con una cubierta exterior protectora de metal. En la figura 2.6 se muestra un diagrama de una válvula pequeña típica .

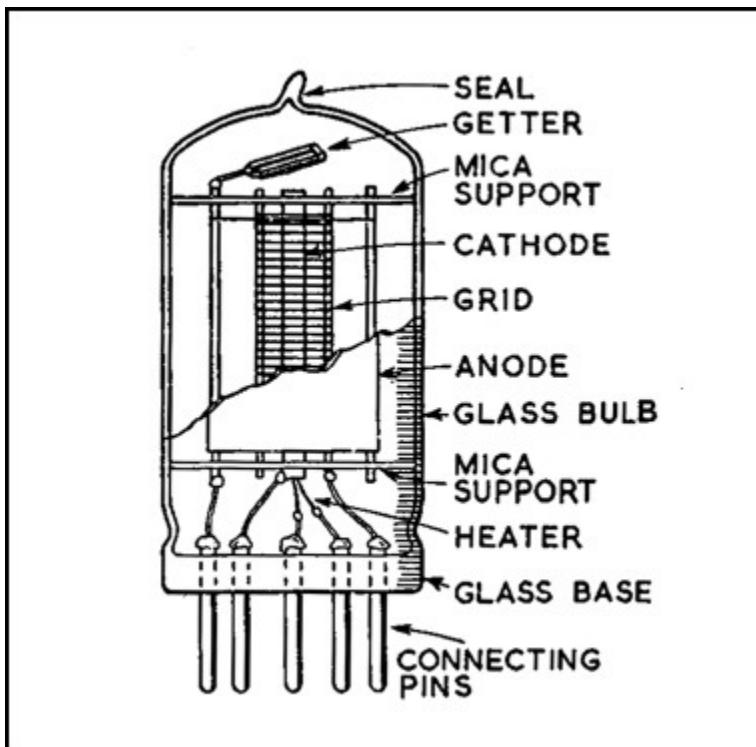


Fig 2.6: Construcción interna de una válvula pequeña.

Los dos de la izquierda son diferentes variantes de la misma válvula y ambos tienen la base octal. Uno es el tipo anterior, que se pega al sobre de vidrio; el envuelto en metal tiene la base octal compuesta posterior y la espiga polarizadora. Las dos válvulas de vidrio más pequeñas tienen el sello de vacío en la parte superior como una pequeña pepita de vidrio. El revestimiento de getter plateado se puede ver en la parte superior de la válvula central.

A la derecha hay una imagen que mira dentro de una válvula de transmisión típica, para mostrar la construcción de la red. Este es un Mullard QV06-40 sin la envoltura exterior y sin las placas del ánodo.

La rejilla de alambre visible es la rejilla de la pantalla. Detrás está la rejilla de control y la estructura del cátodo calentada indirectamente. La placa de mica rectangular de la derecha tiene dos orificios para alinear las dos placas de ánodo. El anillo de cribado de la base es parcialmente visible a la izquierda. Los soportes metálicos alrededor de la parte central son las placas formadoras de vigas. En la parte superior están las dos “banderas” de neutralización acopladas en cruz.

1.2.7 Disipación y enfriamiento del ánodo

Para cada tipo de válvula existe una temperatura de funcionamiento segura y una disipación del ánodo. La disipación se calcula como vatios de potencia disipados en el ánodo. La válvula debe mantenerse por debajo de una cierta temperatura máxima para una vida útil prolongada y un funcionamiento confiable. Hay varias formas diferentes en que el ánodo se deshace del calor disipado y varía de un tipo a otro.

En las válvulas de envoltura de vidrio pequeñas, normalmente es una mezcla de radiación y conducción. El calor infrarrojo pasará a través de un vacío y llegará al sobre de vidrio exterior, que luego emite el calor al aire circundante. En válvulas de baja potencia, a menudo esto es suficiente para mantener la válvula fría. Algunos ánodos de válvulas más grandes brillan en rojo apagado a máxima potencia, como una forma de aumentar el efecto de enfriamiento infrarrojo. En algunos otros tipos, el calor sube por los cables de soporte del ánodo y sale a las clavijas, donde se puede disipar, ya sea a través del cableado del enchufe de la base o, en el caso de los ánodos de la tapa superior, con accesorios especiales de enfriador con aletas. Otros tipos requieren enfriamiento por aire forzado soplado en el sobre o mediante un enfriador de aletas. Algunas válvulas de transmisión muy grandes necesitan refrigeración líquida para disipar el calor.

Los fabricantes normalmente establecen la disipación segura máxima y la temperatura máxima recomendada de envoltura y sellado para garantizar un funcionamiento confiable. Es importante prestar atención a estas recomendaciones para lograr la máxima vida útil de la válvula.

Para las válvulas de tetrodo transmisor de gran tamaño, no solo el ánodo disipa una cantidad apreciable de energía, sino también la rejilla de la pantalla. Si se opera a una temperatura inssegura, a menudo conducirá a fallas catastróficas. Si la temperatura alcanza la temperatura de ablandamiento de la envoltura de vidrio, se sabe que el alto vacío hace que la envoltura implosione al succionar el vidrio blando.

Por lo general, no hay peligro de sobreenfriar una válvula y puede mejorar significativamente la vida útil. Eimac proporciona algunos datos sobre la vida útil de la válvula con valores de temperatura para válvulas de encapsulado de vidrio. Por ejemplo, una reducción de la temperatura de la envoltura de vidrio tan solo 25C por debajo del máximo puede aumentar la vida útil en un 25%. Una reducción de 50C casi duplica la vida.

1.2.8 Eficiencia

Cualquier dispositivo, al convertir energía de una forma a otra, siempre sufre alguna pérdida o ineficiencia. Las válvulas no son una excepción a esta regla. Por cada vatio de potencia de entrada de CC, no es razonable esperar la misma potencia de salida. La cantidad de potencia de entrada de CC que se convertirá en salida se define por la eficiencia.

Generalmente, usamos la fórmula simple:

Eficiencia

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

De los distintos modos de funcionamiento, algunos son más eficientes que otros. Para los amplificadores de RF, los mas eficientes son los Clase C, los siguientes son los Clase B y la menor es la Clase A. Se puede calcular exactamente qué tan bien cada modo de funcionamiento puede convertir

la potencia de entrada de CC en la potencia de salida a partir de los primeros principios. Y aquí es donde el tema se vuelve interesante.

Durante muchos años, el tema estuvo empañado por una tabla que apareció originalmente en un libro de texto que mostraba el valor teórico de la eficiencia que sería posible con una válvula ideal.

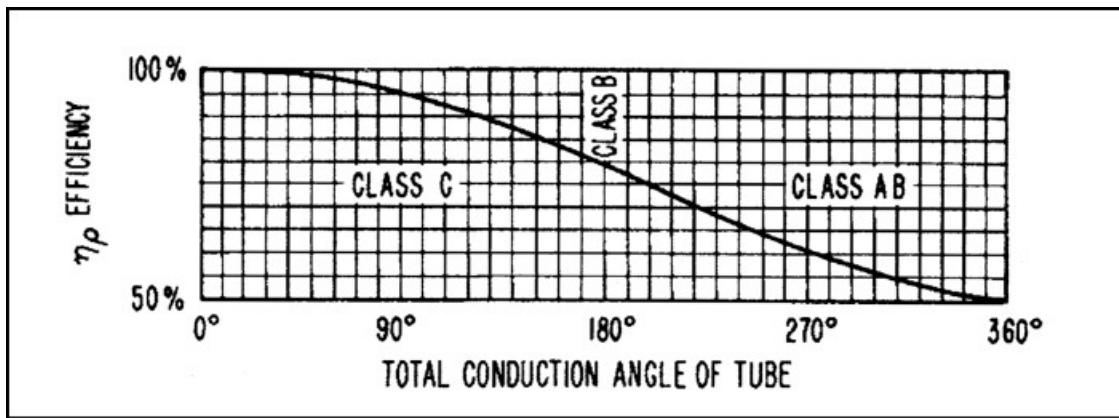


Fig. 2.7:

Eficiencia teórica para varios ángulos de conducción. (Tomado de Thomas L Martin Jr, 'Circuitos electrónicos', Prentice-Hall Inc, 1955.)

Sin embargo, este gráfico y los cálculos hicieron una suposición ideales. Se suponía que la válvula podía oscilar el voltaje del ánodo en un rango igual al voltaje de suministro de CC. Esto significa que el voltaje del ánodo bajaría a cero voltios y hasta el doble del voltaje de suministro. No se conoce ninguna válvula que pueda funcionar de esta manera. Es prácticamente imposible hacer descender el voltaje del ánodo a cero voltios, incluso si se usa un tipo de triodo grande.

En consecuencia, la oscilación hacia arriba no puede ser mayor que la oscilación hacia abajo para un circuito de ánodo resonante que está estrechamente acoplado a la carga para transferir la potencia máxima. En un amplificador de Clase C, el ángulo de conducción normalmente no es inferior a unos 60 grados y, muy a menudo, es necesario utilizar más, hasta unos 150 grados, y esto requiere una gran cantidad de excitación para alcanzarlo. Si se utilizara este método, la potencia de accionamiento requerida sería excesiva y la disipación de la red sería destructiva. En la práctica, el ángulo de conducción mínimo es de aproximadamente 90 a 120 grados. Entonces, aunque el gráfico muestra que un amplificador de Clase C puede alcanzar el 100% de eficiencia, en la práctica no es así. Si se considera el punto teórico del 100% en la curva, entonces el ángulo de conducción es 0 grados, lo cual es imposible de alcanzar. Aunque, con amplificadores pulsados de muy alta potencia, el ángulo de conducción puede acercarse a 45 grados, el espacio entre pulsos es largo y la corriente media de la red es bastante baja.

Terman [1], sin embargo, sí calculó los límites teóricos con una válvula comportándose de manera correcta, bajo lo que se consideraría funcionamiento normal. Los valores que calculó han resistido la prueba del tiempo y se ha demostrado que son correctos para el caso de la válvula ideal. Dio el valor para un amplificador Clase C como máximo 84%, Clase B como máximo 78.5% y Clase A como máximo 25%. Las clases intermedias de AB 1 y AB 2 son 50% y 55% respectivamente. A partir de muchas pruebas, estos valores están bien probados cuando se examinan los amplificadores prácticos. Sin embargo, en un amplificador práctico nunca alcanzamos las condiciones ideales, por lo que los números siempre son un poco más bajos.

[1] Frederick Emmons 'Fred' Terman (1900 - 1982), fue profesor de Ingeniería Eléctrica, Decano de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Stanford, Estados Unidos. Escribió dos libros de

texto estándar, Radio Engineering , publicado por primera vez en 1932, y Electronic and Radio Engineering en 1955.

1.3 Trabajo con curvas características de válvulas

Al diseñar el equipo de válvulas, necesitamos encontrar los datos correctos para la válvula en particular que se está utilizando. Esto se puede obtener de la hoja de datos del fabricante, que hoy en día a menudo se puede encontrar en Internet sin problemas. La hoja de datos contendrá mucha información, algunas en formato corto y otras en una serie de curvas. A menudo, los datos contenidos en las curvas parecen ser solo muchas líneas y curvas y, a primera vista, no ayudan mucho. Sin embargo, si estas curvas se interpretan correctamente, se dispone de una gran cantidad de datos de diseño válidos.

Los datos de forma abreviada se darán a menudo en tablas y normalmente contendrán datos sobre las clasificaciones máximas, voltaje y corriente del filamento, capacitancia de los diversos electrodos y, por lo general, alguna indicación de la frecuencia de funcionamiento máxima y cualquier reducción necesaria. Echemos un vistazo a estos datos de formato corto para ver qué nos dicen.

1.3.1 Máximos ratings

Muy a menudo, estos se dividen en áreas críticas y otras que no lo son tanto. Los elementos críticos serán cosas como el voltaje máximo del ánodo, la corriente del ánodo, la disipación del ánodo y la temperatura. Exceder cualquiera de estos en una gran cantidad es probable que acorte la vida útil de la válvula o cause una falla catastrófica. De manera similar, algunas válvulas necesitan una buena regulación del suministro de filamento para una larga vida. Mullard afirma que, en general, se necesita una tolerancia de $\pm 2,5\%$ o más para una vida útil más larga, aunque algunas válvulas diseñadas para aplicaciones de radio móvil pueden tolerar hasta $\pm 10\%$ durante períodos cortos.

Otros elementos de clasificación máxima serán la frecuencia de funcionamiento y la potencia o corriente de entrada de CC. Obviamente, si la válvula está diseñada para amplificación de RF, no tiene sentido seleccionar una válvula que no funcione correctamente con la frecuencia elegida. Normalmente, las válvulas no dejan de funcionar cuando se excede la frecuencia máxima, sino que disminuyen gradualmente en ganancia y eficiencia a medida que aumenta la frecuencia.

1.3.2 Recomendaciones operativas típicas

Normalmente, el fabricante dará algunos ejemplos de los valores óptimos de voltaje de ánodo y potencia de salida que se esperan cuando se opera con los voltajes y corrientes de suministro recomendados. Por lo general, son una muy buena indicación de si la válvula cumplirá con sus requisitos. Es prudente seleccionar una válvula que tenga un poco de capacidad en la mano, para que no se sienta decepcionado cuando finalmente se construya el equipo. Por ejemplo, si la frecuencia de funcionamiento es de 145 MHz, se requiere una válvula con al menos esta clasificación y, a menudo, los fabricantes dan un ejemplo de funcionamiento a 175 MHz. En este caso 145MHz es bastante más bajo y esta válvula sería suficiente. Sin embargo, si se necesitan 432MHz, esta válvula no será de mucha utilidad.

Los valores recomendados para el voltaje y la corriente del ánodo darán una buena vida útil a la válvula cuando se cumpla con la clasificación CCS, Servicio comercial continuo . Estos asumen que la operación es el 100% de las calificaciones las 24 horas del día. Durante períodos cortos (clasificación intermitente), algunos de los parámetros pueden superarse en aproximadamente un

25% sin degradar gravemente la vida útil de la válvula. Estas clasificaciones son las clasificaciones ICAS - Servicio comercial y aficionado intermitente calificaciones. Estos deben considerarse con cierta cautela. Normalmente se permite aumentar el voltaje del ánodo hasta en un 25% de la clasificación CCS máxima, pero se asume que la corriente del ánodo es la misma que la clasificación CCS. Es decir, puede aumentar uno de ellos pero no ambos simultáneamente. Mullard afirma que donde la eficiencia de la etapa es crítica (menor calor desarrollado) es preferible mantener el voltaje del ánodo tan alto como sea práctico dentro de los valores nominales normales y reducir la corriente del ánodo. Reducir el voltaje del ánodo y aumentar la corriente del ánodo para lograr la misma potencia de entrada no es tan eficiente y, en algunos casos, puede reducir radicalmente la vida útil del cátodo.

Hay tantas válvulas diferentes disponibles que tratar de cubrir todos los tipos sería imposible. Por tanto, este capítulo se centrará en una serie de válvulas en particular. Este es el popular tetrodo dual, el Mullard QKV06-40, que es parte de una familia de válvulas VHF / UHF. Esto también va bajo el número estadounidense de 5894 y QQE06-40 es la designación posterior. Otros de la serie son las series QKV03-20, QKV07-50, YL-1060 y YL-1070. También cubre la versión de filamento de calentamiento rápido QQZ06-40 / YL-1030.

Para dar sentido a los datos de la válvula, necesitamos saber cómo interpretar las curvas características y lo que cada curva nos puede decir.

La conductancia es la inversa de la resistencia: su unidad abreviada se muestra como G o g. Es

1.3.3 Transconductancia S (g_m)

Esta es una terminología utilizada tanto para válvulas como para dispositivos semiconductores y es la abreviatura de conductancia de transferencia . En días anteriores se conocía como conductancia mutua y es por eso que la notación abreviada es g m . Si miramos una hoja de datos de válvula o transistor típica, normalmente se indica de una de varias maneras diferentes. La razón es que a lo largo de los años, la industria cambió del antiguo sistema de medición al moderno sistema ISO.

1.3.4 Unidades de conductancia

En el antiguo sistema de medición, la unidad de conductancia era el mho . Esta es la palabra Ohm escrita al revés y tenía sentido usarla ya que conductancia es el recíproco de resistencia. Una resistencia de $1\ \Omega$ es una conductancia de 1 mho. Sin embargo, una resistencia de $0,1\Omega$ equivale a una conductancia de 10 mho. (El Ohm lleva el nombre de un científico alemán Dr. GS Ohm, por lo tanto, cuando se usa, usa la letra mayúscula. El mho no lleva el nombre de una persona, por lo que usa la letra minúscula).

En las hojas de datos de los fabricantes estadounidenses vemos en los dispositivos más antiguos la transconductancia expresada en micro-mhos , que se abrevia como μ mho . Hoy hemos avanzado y, después de pasar por un período de transición, llegamos al método moderno de establecer la conductancia. En válvulas y semiconductores, la conductancia de transferencia es una medida de cuánto variará la corriente cuando se varíe la señal de entrada. Tradicionalmente, la unidad de medición de transconductancia es el mili-Amp (mA) para un cambio de 1V en la señal de entrada. El símbolo abreviado de transconductancia se conoce como g m . Por tanto, el g m de un dispositivo se da en mA / V.

Las hojas de datos de válvulas de los fabricantes estadounidenses más antiguos, cuando se carac

Cuanto mayor sea el valor de transconductancia, menor debe ser la señal de activación de la red para proporcionar una cantidad adecuada de corriente de ánodo para que fluya.

Un triodo pequeño puede tener una transconductancia tan baja como $2.5mA/V$ mientras que un tetrodo de transmisión grande puede ser tan alto como $50mA/V$. El valor de transconductancia es, por tanto, una indicación de la ganancia de potencia de una válvula, una alta transconductancia equivale a una alta ganancia de potencia.

1.3.5 Gráficos y curvas de válvulas

Cuando se examinan las curvas de corriente del ánodo de una válvula en una hoja de datos, es normal encontrar que las curvas en el gráfico son de hecho curvas y no líneas rectas. Esto puede ser engañoso porque los gráficos de los fabricantes se obtienen de una manera diferente a como se operará normalmente la válvula.

Las curvas se conocen normalmente como curvas de corriente constante, ya que la válvula recibe un voltaje de suministro de ánodo fijo, quizás $100V$, y la corriente del ánodo varía variando el voltaje de la red de control. La válvula se comporta como una resistencia variable a medida que varía la tensión de la red. El voltaje de la red se cambia en pasos lógicos y en cada voltaje de la red se registra la corriente del ánodo. Cuando se ha trazado un conjunto de curvas, el suministro del ánodo se cambia a otro voltaje de CC, quizás $150V$, y se mide un nuevo conjunto de puntos. Esto se repite tantas veces como sea necesario para cubrir el rango de voltaje del ánodo y luego todos los puntos trazados se dibujan en un solo gráfico. Todo esto requiere mucho esfuerzo para obtener resultados precisos y es un proceso largo.

1.4 Curvas características de la válvula

Hay tres conjuntos básicos de curvas y cada uno brinda información específica sobre cómo se comporta la válvula en diferentes condiciones de operación.

Algunas válvulas que se utilizan hoy en día para amplificación de RF no se especificaron originalmente para amplificación lineal (o incluso para funciones de amplificador de RF; originalmente, la válvula 811 solo estaba clasificada como amplificador de audio), sino para funcionamiento de Clase C. Aunque la hoja de datos se centra principalmente en la operación de Clase C, al extraer información de las curvas podemos determinar el mejor método de operación en distontas Clases.

El primer conjunto de curvas para la válvula QQV06-40 / 5894 se muestra en la Fig 3.2. El QQE06-40 es prácticamente idéntico. Mullard proporciona dos conjuntos de curvas diferentes. Uno es para un voltaje de rejilla de pantalla de $200V$ y el otro es para $250V$. Para obtener la máxima ganancia y potencia de salida, normalmente seleccionaríamos la opción $250V$. Sin embargo, más adelante veremos que esta no siempre es la mejor opción.

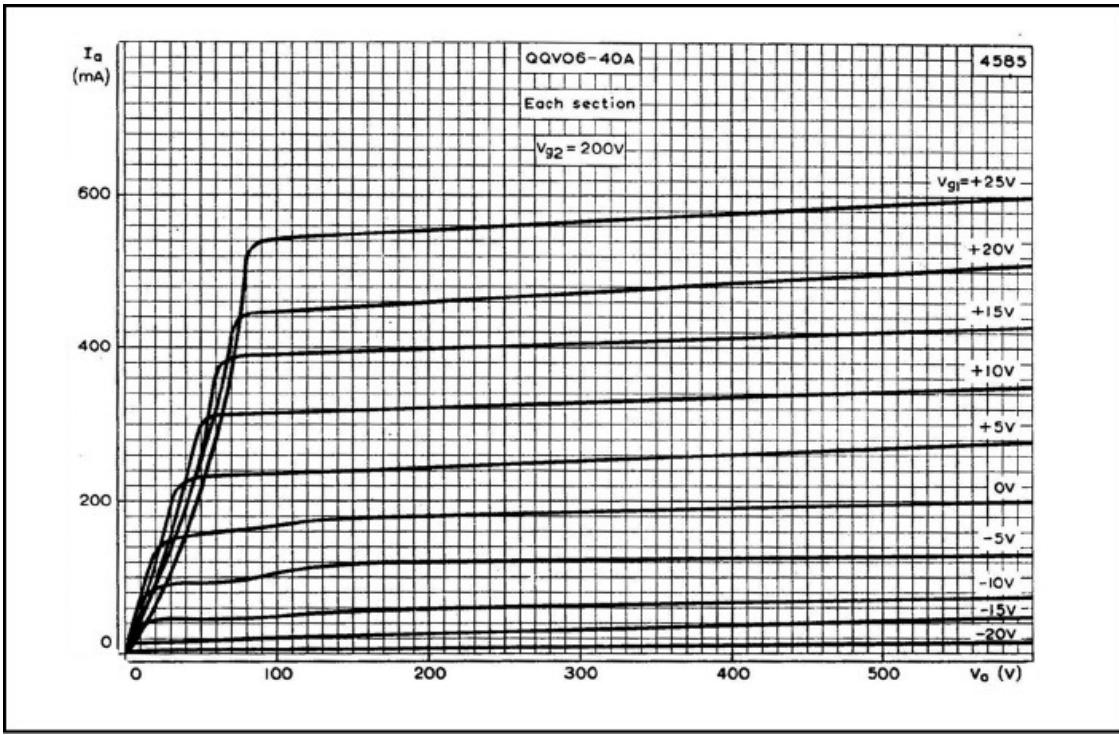


Fig. 3.2:

Curvas de corriente constante para el QSV06-40 con $V_{g2} = 200V$ (del Manual técnico de Mullard, Libro 2 Parte 4, ‘Válvulas y tubos’, 1969).

El eje horizontal de las curvas da la tensión de alimentación del ánodo (V_a) y el eje vertical da la corriente del ánodo. Como se trata de una válvula doble, los gráficos muestran cómo se comporta cada sección individual o la mitad de la válvula.

Las distintas curvas son para diferentes tensiones de la red de control (V_{g1}), que se trazan entre $-20V$ y $+25V$. En la operación de Clase C, la rejilla de control se balancea muy por encima del punto de voltaje cero, por lo que fluye una corriente de red considerable. Esto permite una alta eficiencia y una alta potencia de salida. Por lo general, la válvula puede alcanzar una eficiencia de 75% a $175MHz$ en funcionamiento de Clase C. Cuando se opera como un amplificador lineal en Clase AB, la eficiencia será menor.

Supongamos que el voltaje del ánodo no es de $600V$ sino algo más bajo: $500V$ es conveniente y, por lo tanto, se utilizará para esta explicación. Antes de comenzar a extraer datos, debemos presentar el segundo gráfico. Esto es similar al primero, pero brinda información adicional que necesitamos para comenzar el diseño. Este gráfico también contiene el tercer conjunto de curvas, las curvas de corriente de la cuadrícula. (Hay otro conjunto de gráficos que ignoraremos por ahora, estos gráficos detallan la cuadrícula de la pantalla actual).

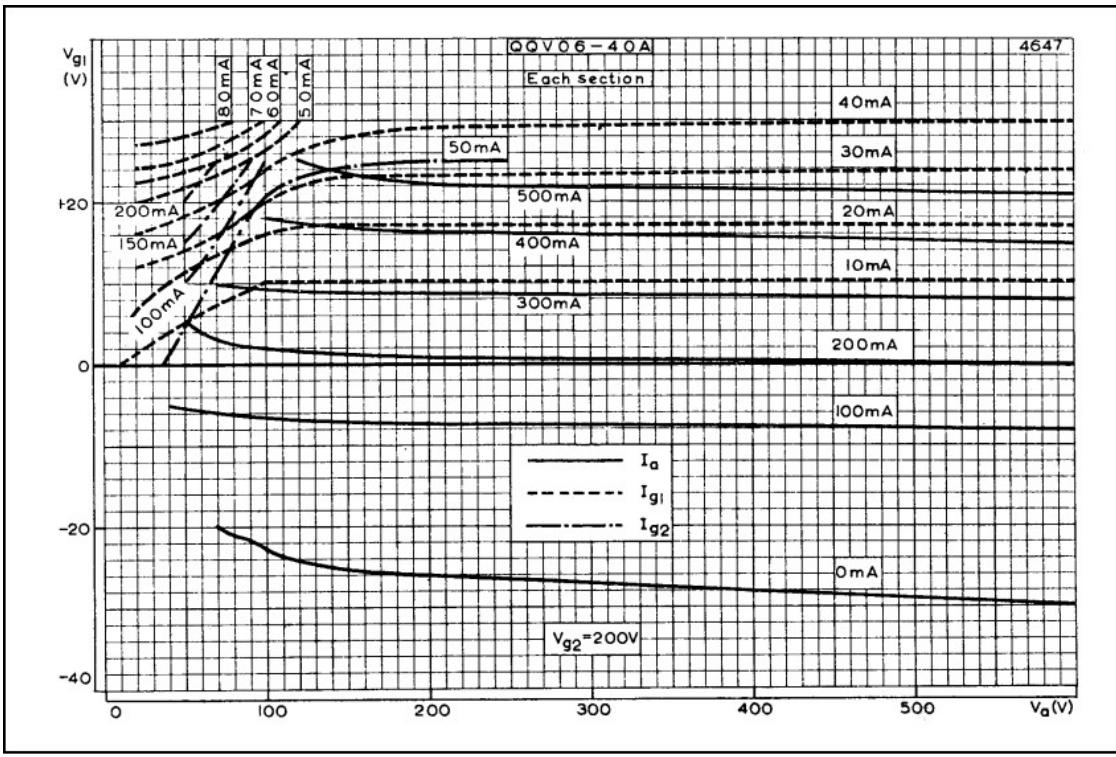


Fig. 3.3:

Curvas QQQV06-40 de la corriente del ánodo frente al voltaje de la rejilla de control (del Manual técnico de Mullard, Libro 2 Parte 4, ‘Válvulas y tubos’, 1969).

Las curvas también contienen los detalles de la corriente de la red de control que se espera en diversas condiciones de funcionamiento. Al igual que con los datos publicados por todos los fabricantes, los resultados son el promedio de muchas válvulas nuevas diferentes, por lo que su válvula puede estar muy cerca, pero no necesariamente idéntica, a las curvas dadas. Si la válvula ha estado en servicio durante algún tiempo o ha estado almacenada durante un período prolongado, es de esperar una pequeña degradación. Usando la tabla, podemos determinar si la válvula es realmente buena para la aplicación prevista.

Para comenzar el diseño, primero necesitamos determinar qué voltaje de la rejilla de control se requerirá para cortar la corriente del ánodo para que la válvula esté polarizada en la Clase C. Esto se encuentra moviéndose a lo largo de la curva inferior de 0 ampere hasta que la curva intercepta los 500V. Ahora dibujamos una línea horizontal para interceptar el eje vertical de la izquierda que es la escala V_{g1} . Esta escala es de 2V por división. Encontramos que necesita $-29V$ para llevar la corriente del ánodo a $0mA$.

Construir una tabla de corriente de ánodo versus voltaje de entrada es simple. Dibujamos una línea vertical a $500V$ y leemos en cada curva de corriente de ánodo cuál es el valor de V_{g1} .

Corriente de ánodo mA	V_{g1} voltios
0	-29
100	-8
200	0
300	+10
400	+15

Corriente de ánodo mA	V_{g1} voltios
500	+19

Tabla 3.1: Corriente del ánodo QQQV06-40 versus voltaje de entrada del variador.

A partir del mismo gráfico también podemos establecer cuál será el valor de la corriente de la red para diferentes niveles de conducción. Obviamente, no puede fluir corriente de rejilla hasta que la rejilla de control sea positiva con respecto al cátodo y el eje vertical marcado V_{g1} sea realmente la V_{g1} a la medición del cátodo, pero a menudo se omite por simplicidad. Al utilizar un método de trazado similar, podemos determinar el voltaje de red requerido para la corriente de red, ya que están marcados en incrementos de $10mA$ desde $10mA$ hasta $40mA$. Esto se muestra en la Tabla 3.2 .

Corriente de red mA	V_{g1} voltios
10	+10
20	+17
30	+24
40	+30

Tabla 3.2: Corriente de red QQQV06-40 versus voltaje de entrada del variador.

Mullard afirma que para una mejor eficiencia bajo la Clase C se requiere una corriente de red de $\sim 4mA$, pero una corriente de red excesiva provoca el calentamiento de la estructura de la red y no se recomienda usar más de aproximadamente $5mA$ a $10mA$. A partir de esto, podemos interpolar que el voltaje máximo de red requerido es de aproximadamente $+5V$. El voltaje de corte que hemos determinado es de $-29V$, por lo que para oscilar la red hasta $+5V$ es un voltaje pico de $(29 + 5) = 34V$. Para encontrar el voltaje del variador en valor RMS, dividimos $34V$ por $\sqrt{2}$ y obtenemos un valor de $24VRMS$. En la práctica, normalmente polarizamos la rejilla de control mucho más bajo, una elección típica sería el doble del voltaje de corte. Por tanto, esto equivale a un voltaje de polarización de red de aproximadamente $-58V$. Para que ahora la rejilla oscile en positivo en $+5V$, se necesita una oscilación de voltaje pico de $(58 + 5) = 63V$, una señal de entrada RMS de aproximadamente $45V$.

1.4.1 Funcionamiento push-pull y paralelo

Esta familia de válvulas, aunque originalmente diseñada para operación push-pull, también se puede usar con las dos mitades atadas en paralelo. La 6146 tiene una disipación de ánodo de $20W$ (también fue fabricado por Mullard como QV06-20) y cada mitad del QQQV06-40 tiene la misma disipación de ánodo.

Hay que aclarar que actualmente solo estamos tratando con la mitad de la válvula, por lo que las corrientes que determinamos son la mitad del total que la válvula consumirá en funcionamiento, pero solo si las dos mitades están atadas en paralelo. Las corrientes de red y ánodo serán el doble de los valores que hemos determinado hasta ahora.

Sin embargo, en un amplificador push-pull, las dos válvulas son impulsadas por una tensión de red, que está desfasada 180° . Cuando la mitad se acciona con una corriente de ánodo creciente, debido

a que el voltaje de la red aumenta hacia la condición positiva, la mitad opuesta tiene un voltaje de red negativo en aumento y su corriente de ánodo cae hacia cero. El resultado neto es que la corriente de ánodo medida es aproximadamente la corriente de ánodo verdadera de la mitad. Al igual que con el amplificador paralelo, cada mitad de la válvula proporciona la mitad de la potencia de salida total, pero en el amplificador push-pull se turnan para suministrar la potencia. En un amplificador paralelo, ambas válvulas funcionan juntas.

La otra cosa a apreciar es que las corrientes son el valor pico al que oscilarán la red y el ánodo en la mitad positiva de la señal de entrada. El valor medio de una forma de onda sinusoidal es 0,637 del pico. Cualquier medidor de corriente de ánodo o rejilla es un tipo de lectura promedio, por lo que las corrientes mostradas no son los valores máximos reales.

1.4.2 Trazar un gráfico alternativo

Es útil tomar lecturas adicionales de los gráficos para construir un conjunto más completo de puntos de datos para el voltaje de ánodo particular requerido. Esto despeja la mayor parte del desorden de las curvas normales y hace que sea más fácil ver la imagen.

La figura es un gráfico de una curva típica para la válvula QQQV06-40 / 5894 para un voltaje de pantalla de 200V y 250V cuando el suministro del ánodo es de 600V, por lo que podemos ver las diferencias. En este caso, la válvula no está polarizada para el corte sino para el funcionamiento de Clase AB1 .

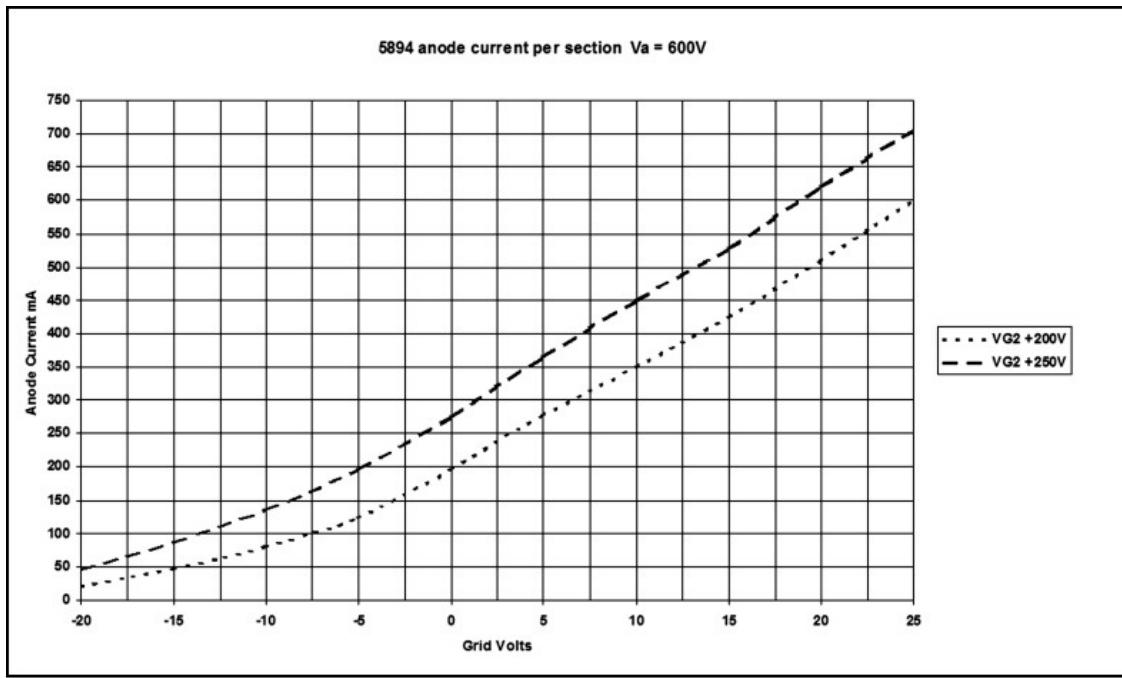


Fig. 3.4:

Curva característica típica.

Como se puede ver, el uso de $V_{g2} = 250V$ permite alcanzar una entrada de potencia más alta y, por lo tanto, una ganancia y una potencia de salida mayores que 200V. Sin embargo, significa que se debe tener más cuidado de que el nivel de excitación de entrada no sea excesivo para evitar una disipación excesiva en la válvula.

1.4.3 Resistencia del ánodo

La resistencia que exhibe el ánodo está determinada por el voltaje rejilla-cátodo. Cuando el voltaje de la red es menor que el voltaje de corte, la válvula parece comportarse como un ánodo a una resistencia catódica muy alta. A medida que la tensión de la red aumenta de forma positiva, la resistencia del ánodo desciende a un valor más bajo. La figura muestra cómo se comporta una válvula típica cuando se varía el voltaje de la red.

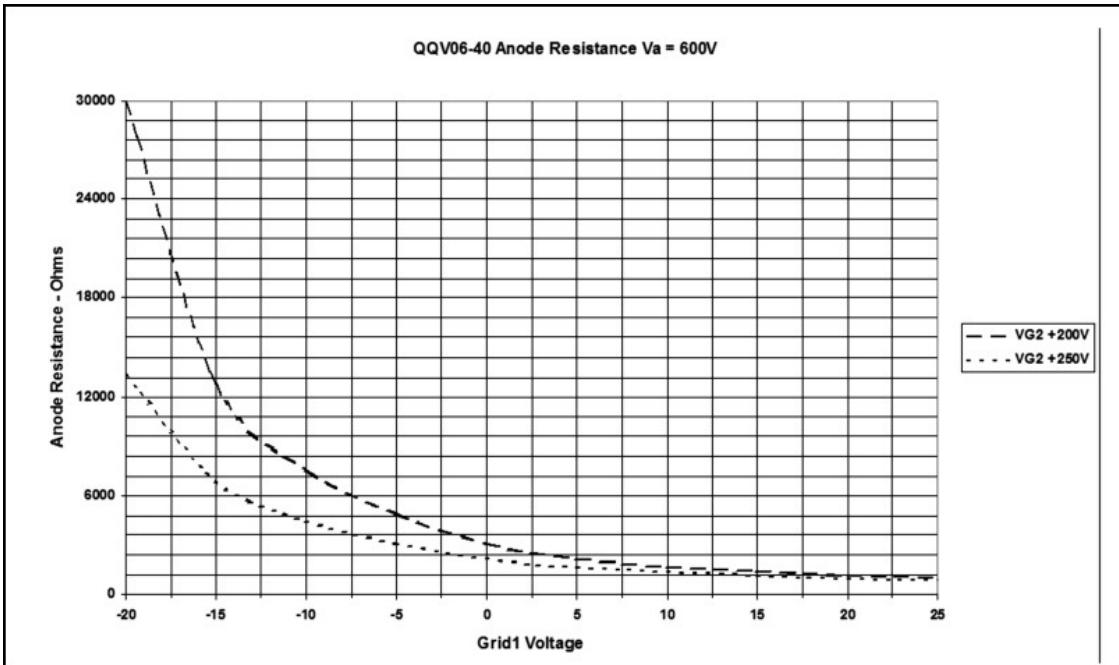


Fig:

Variación típica de la resistencia del ánodo frente al voltaje de la red de control.

A una tensión de red de $-20V$, la resistencia del ánodo es alta. A medida que se reduce la polarización de la red, la resistencia cae a un valor bajo. La resistencia también está determinada por el voltaje de la rejilla de la pantalla (V_{g2}) y los valores más altos de V_{g2} hacen que fluya más corriente ya que la resistencia puede reducirse. Cuando el voltaje de la red supera los $0 V$, la red ahora es positiva con respecto al cátodo y fluye una mayor corriente de ánodo para el mismo voltaje de ánodo y voltaje de la red de pantalla.

Como era de esperar, cuando el voltaje de la red de la pantalla es mayor, la válvula puede consumir más corriente de ánodo para un voltaje de red particular. Tiene más ganancia de corriente y, por lo tanto, una menor resistencia del ánodo. De esta tabla podemos determinar la carga del ánodo requerida para extraer la potencia máxima de la válvula, el criterio de coincidencia conjugada . Se puede determinar que cada mitad de la válvula exhibe una resistencia de aproximadamente $2k\Omega$ cuando el voltaje de la red oscila hasta $0V$, que es el máximo impulso posible en la Clase AB. Por lo tanto, en un amplificador push-pull, el circuito del tanque del ánodo debe ser de $\sim 4k\Omega$ ánodo-ánodo para una transferencia de potencia máxima en la salida máxima. En funcionamiento en paralelo, la resistencia del ánodo o la carga se reduce a la mitad.

Cuando la válvula no está completamente accionada, la resistencia del ánodo es mayor y ya no cumple con los criterios de coincidencia conjugada, ya que el circuito del tanque del ánodo está fijado a una resistencia de carga particular. Entonces, la eficiencia será mucho menor que en la producción máxima. Teniendo en cuenta la eficiencia típica que se puede lograr en la Clase AB1

, en el mejor de los casos, es solo del 55% aproximadamente. La eficiencia cuando la válvula solo se impulsa a la mitad de la potencia será del 27,5% y si solo se impulsa a un cuarto de potencia será del 12,75% en el mejor de los casos. En el funcionamiento en SSB, la potencia máxima sólo se produce raras veces, ya que la potencia media suele ser mucho menor.

Para la Clase AB, la válvula se conecta a la corriente de la red. La cantidad que se puede tolerar depende en gran medida de cuán lineal sea la válvula. El QQV06-40 no fue diseñado específicamente para funcionar en modos lineales y normalmente no puede tolerar más de aproximadamente $1mA$ de corriente de red antes de que se vuelva no lineal. Esto limita la potencia adicional que la válvula podría proporcionar en funcionamiento AB2. Para la Clase C, donde la linealidad no es un problema, la válvula puede proporcionar una salida de potencia considerablemente mayor con una mayor eficiencia.

1.4.4 Comprobación de vida útil

Si su válvula tiene una vida anterior dudosa, una simple prueba determinará si es adecuada para un uso posterior. Todas las válvulas se degradan lentamente a lo largo de su vida, ya que el cátodo puede haber perdido parte de su emisión y ya no se ajusta a los datos del fabricante. Comprobar la emisión es sencillo. Encienda el filamento y aplique un ánodo conocido, una rejilla de pantalla y un suministro de polarización variable a la rejilla de control. Intente elegir un voltaje de ánodo y un voltaje de red de pantalla cercano a los valores recomendados. Un método más seguro y simple es atar la rejilla de la pantalla y los ánodos juntos y las dos rejillas de control juntas para operar las dos mitades en paralelo como un triodo doble. Use un voltaje de suministro bastante bajo, +200V dará un resultado válido ya que esto se traza en las curvas de voltaje del ánodo para el gráfico de 200V V g2.

Al medir la corriente de ánodo a medida que varía el voltaje de la red, podemos ver qué corriente de ánodo es posible. Esto debe hacerse con una corriente de ánodo baja porque si la corriente es demasiado alta, el peligro de dañar la válvula es mayor: no mantenga la corriente de ánodo encendida durante más tiempo del necesario para realizar una medición.

Aplique un voltaje de red negativo alto y disminuya gradualmente hasta que vea que comienza a fluir una pequeña corriente de ánodo. Ajuste el voltaje de la red para obtener una corriente de ánodo lógica, digamos 200mA, esta es la curva marcada como 100mA ya que las dos mitades están ahora conectadas en paralelo y lea el voltaje de la red para esta corriente. Esta corriente de ánodo es la disipación de ánodo máxima permitida de las dos válvulas, siendo $(200V \cdot 0.2A) = 40W$. Siempre que la medición se realice rápidamente, no dañará la válvula.

La QQV06-40 puede tolerar esta disipación durante varios minutos si tiene un enfriamiento adecuado. La válvula se calentará, pero no tanto como para dañarla. Ahora, al encontrar la curva de corriente de ánodo aplicable, puede determinar qué voltaje de red debería ser necesario para esta corriente de ánodo. (En la figura 3.3 el voltaje de la red de corte de 0 mA es de aproximadamente $-26V$ y la curva de 100mA requiere aproximadamente $-7,5V$). Puede que tenga que estimar a partir de las curvas el voltaje de red aproximado. Si el voltaje de la red es mucho más bajo (menos negativo) que el valor del fabricante, la emisión es baja y puede que no valga la pena continuar.

Las válvulas utilizadas en receptores y válvulas de transmisión de baja potencia son dispositivos de vida útil asombrosamente larga. Es común encontrar que una válvula de 50 años todavía está dentro del 10% de los nuevos valores. Este tipo de válvulas envejecen con gracia y se desvanecen lentamente. Si la emisión es un poco baja, pero superior al 70% de la nueva válvula, a menudo es

possible reformar el cátodo en algunos casos. Para hacer esto, se eliminan todos los demás voltajes de suministro y el voltaje del filamento aumenta en aproximadamente un 20% y la válvula se ‘hornea’ durante aproximadamente una hora. Esto hiere cualquier impureza en el cátodo y la próxima vez que se revisa, la emisión es normalmente mucho mayor. ¡Pero no es un método garantizado!

1.4.5 Datos de potencia de salida del fabricante

Algunos fabricantes proporcionan datos completos y otros simplemente lo mínimo. Mullard tiende a proporcionar datos completos que contienen algunos datos adicionales útiles. En un amplificador de RF de válvula práctico, hay dos valores de potencia de salida cotizados. La primera es la potencia que la válvula puede suministrar al circuito del tanque resonante: Mullard y la mayoría de los demás fabricantes la denominan “Potencia de salida disponible”. Es la potencia que la válvula ha transferido desde la potencia de entrada de CC para aparecer en el ánodo y está disponible para transformarse en la impedancia de salida final de la carga.

El circuito del tanque de ánodo tiene algunas pérdidas asociadas dentro de él, por lo que parte de la potencia del ánodo se pierde en esta red. Lo que queda es la ‘Potencia de carga’ disponible para excitar la antena. Otros fabricantes utilizan una terminología ligeramente diferente, pero el significado es el mismo. La Tabla muestra los datos proporcionados por Mullard para un amplificador Clase C push-pull que usa el QQQV06-40 a 200MHz.

$$V_a = 600V \quad V_{g2} = 250V \quad V_{g1} = -80V \quad Y_o = 2x100mA \quad Y_{og} = 22x9mA \quad Y_{og12} = 3,5mA \\ P_{in}(\text{controlador}) = 3W \quad P_{out}(\text{nodo}) = 90W = 75\% \quad P_L(\text{carga}) = 78W$$

Tabla: Datos de prueba de Mullard para el QQQV06-40 en operación Clase C a 200MHz.

La eficiencia (η) se determinó construyendo una etapa de salida de muy alta calidad utilizando los mejores componentes disponibles (bajas pérdidas) y luego probando la válvula en esta configuración. La eficiencia determinada encaja bien con el valor teórico para una etapa de Clase C. Como podemos ver, los ánodos proporcionaron un total de 90W al circuito del tanque. Después de que la impedancia se transformó a la carga, la potencia medida fue de 78W.

La potencia de entrada de continua en los ánodos es de $P = (600V \cdot 0,2A) = 120W$. La potencia en los ánodos es de 90W y la entrada de continua es de 120W da una eficiencia del $\eta = 75\%$. Sin embargo, la potencia de salida real de la carga es de solo 78W y si se usa para calcular la eficiencia, da un valor de $\eta = \frac{78}{120} = 65\%$. Los 12W perdidos en el circuito del tanque del ánodo es la razón por la que la eficiencia no es el valor que cita Mullard: dan la eficiencia del ánodo calculada para la potencia de entrada del ánodo medida.

Esto se debe a que después de que se utilizó el amplificador de prueba y se tomaron las lecturas, se apagó el amplificador y se quitó la válvula. Luego, se midió la red de salida del amplificador para determinar la pérdida de inserción que proporcionó cuando estaba bajo energía. Por lo tanto, el valor de 90W indicado no es una medida real sino inferida. La potencia perdida en el circuito del tanque es de 12 W de 90 W, que como porcentaje es 13,33%. La pérdida de 1 dB en números redondos es del 20%, por lo que la pérdida del circuito del tanque asciende a aproximadamente 0,66dB.

Mullard no contó la entrada de CC de la rejilla de la pantalla ni la entrada de potencia del filamento como parte de la entrada de CC suministrada a la válvula. El suministro de la rejilla de la pantalla proporcionó una entrada adicional $P = (250 \cdot 0.018) = 4.5W$. Del mismo modo, la potencia del filamento fue $(6,3V \cdot 1,8A) = 11,33W$.

Si se incluyen estas entradas de energía adicionales, el valor de la eficiencia cae bastante. La potencia total de entrada a la válvula es $(120 + 4,5 + 11,33) = 135,83W$ y la potencia de salida a la antena es $78W$. Por tanto, la eficacia real es del 57,4%. Si tenemos en cuenta la fuente de alimentación y otras partes del amplificador que consumen energía (ventiladores, resistencias cuentagotas, etc.), empeora aún más. Si tuviéramos que hacer una medición de entrada de potencia total de la red de CA y compararla con la potencia de salida de RF, es posible terminar con una eficiencia general por debajo del 30%.

Entonces, conocer estos hechos explica por qué cuando medimos un amplificador obtenemos resultados diferentes y no tan buenos como esperábamos. También aclara por qué, al construir un amplificador de RF, la parte crítica es el circuito del tanque del ánodo. Si utiliza componentes inadecuados o con pérdidas potenciales, se puede perder una gran cantidad de energía.

1.4.6 Trazado de corriente de ánodo cuando se polariza al corte

Cuando se opera una válvula en Clase C, la polarización de la red es un voltaje negativo alto y más de lo necesario para cortar la corriente del ánodo. Cuando la señal de entrada se aplica a baja amplitud, no se desarrolla voltaje suficiente para hacer que la válvula comience a conducir. Cuando se eleva la señal de entrada, la corriente del ánodo comienza a fluir en pulsos de corta duración: este es un tipo de operación no lineal. Cuando la señal de excitación está un poco por encima del voltaje de corte, los pulsos de corriente alcanzan una mayor amplitud y la válvula se puede operar con una alta eficiencia. En la Fig. 3.6 se muestra un gráfico de ejemplo para una señal de entrada que está un poco por debajo de la amplitud máxima.

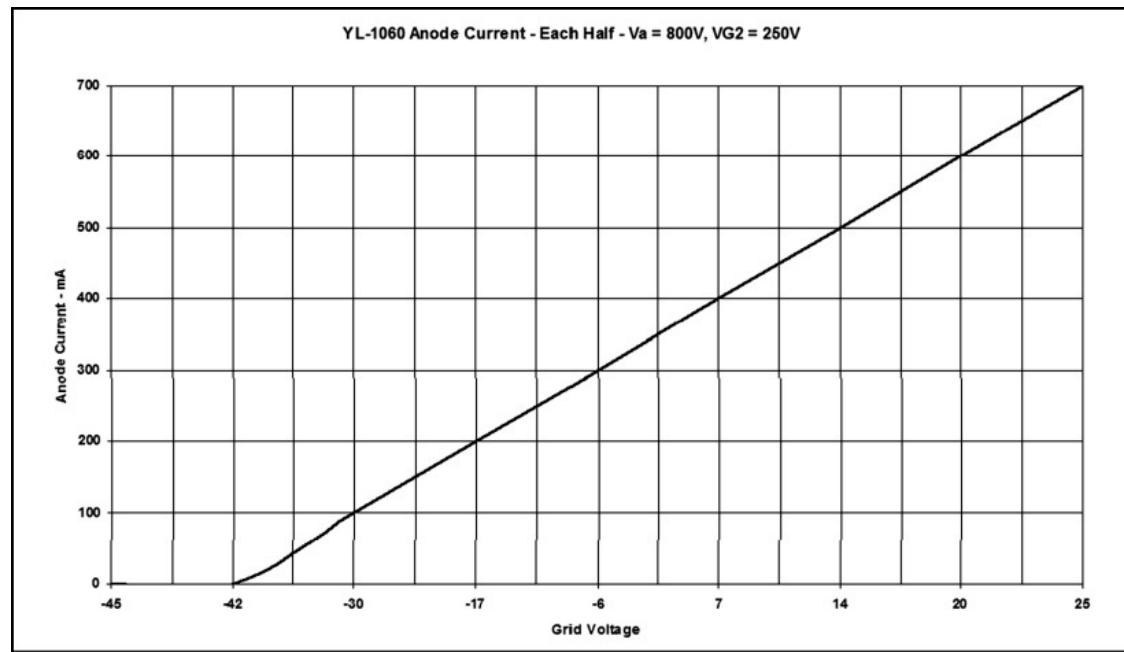


Fig. 3.6:

Gráfico de corriente de ánodo para una válvula polarizada más allá del corte.

La polarización de la red se establece en -45 V para que no fluya corriente sin accionamiento. A medida que la amplitud aumenta gradualmente, la válvula comienza a consumir corriente a -42 V ya que el pico de la señal de entrada está superando la polarización de la red fija. A un nivel de entrada mayor, la corriente del ánodo aumenta. El eje X muestra el voltaje efectivo de cátodo de rejilla. Cuando el voltaje de la red es positivo, la corriente se eleva a una gran amplitud. Esta

válvula en particular es la YL-1060 de doble tetrodo y el gráfico muestra la corriente para la mitad de la válvula.

Si la válvula debe operarse de la manera más lineal, el voltaje de la red no puede exceder los 0V. Si lo hace, la corriente de la red fluirá y la linealidad se verá afectada. Donde la linealidad no es una preocupación, pero se requiere la mayor potencia de salida con buena eficiencia, permitir que la red se vuelva positiva en los picos de la forma de onda sinusoidal de entrada conduce a una mayor potencia y una mejor eficiencia. Sin embargo, hay que pagar una multa por esta opción, que se tratará más adelante.

Cuando vemos la 'calificación CW' en una hoja de datos, no es lo mismo que entienden los radioaficionados.

La curva típica de corriente de ánodo en la Fig. 3.6 destaca uno de los problemas potenciales de la Clase B.

1.4.7 Corriente máxima del ánodo

La corriente máxima que experimentará la válvula depende de la condición de polarización seleccionada y de la amplitud de la señal de activación. Para el amplificador lineal AF y RF hay tres modos de funcionamiento posibles. Estos son Clase B, Clase AB 2 y Clase AB 1 . Para la Clase B, la válvula está polarizada solo para cortar y el voltaje de la red hace oscilar la corriente del ánodo de manera sinusoidal. Para la Clase AB 2, el ánodo consume una pequeña cantidad de corriente inactiva y para la Clase AB 1, la corriente inactiva es mayor. La figura 3.7 ilustra el pulso de corriente de ánodo diferente para un nivel de excitación de entrada similar.

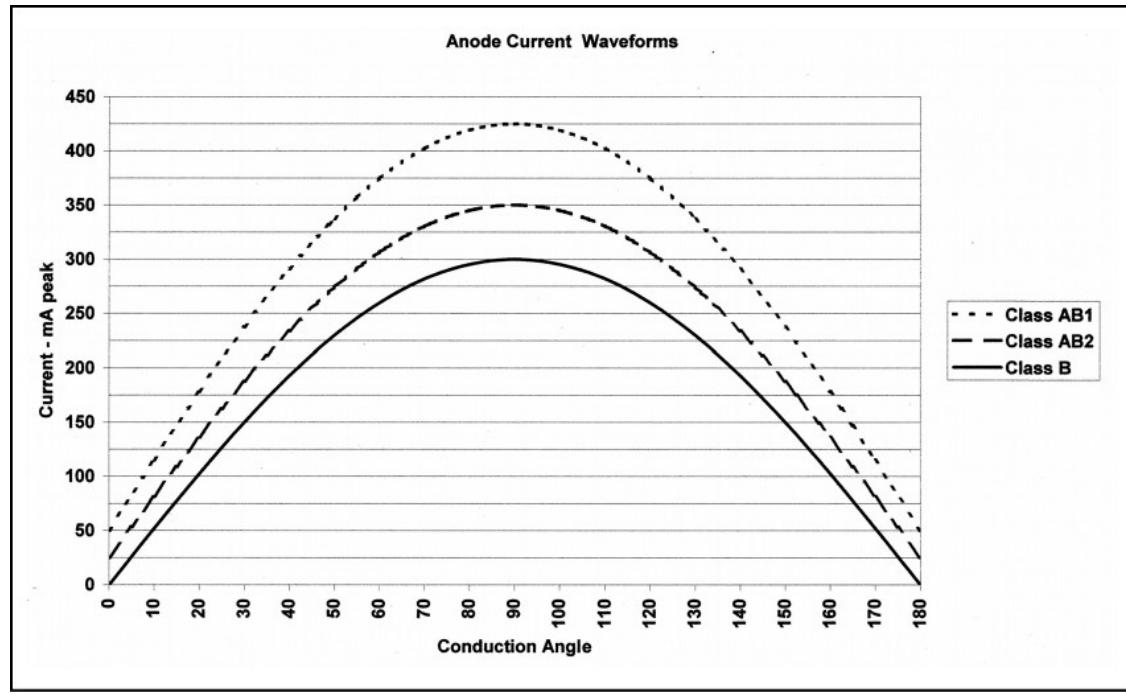


Fig. 3.7:

Pulsos de corriente de ánodo para funcionamiento lineal.

La clase B requiere el mayor nivel de excitación y la corriente del ánodo comienza a cero. La clase AB 2 requiere un nivel de unidad un poco menor y la corriente inactiva es mayor que cero. La clase AB 1 requiere la menor señal de excitación y la corriente inactiva es mayor que la clase AB 2 . En consecuencia, la corriente máxima del ánodo es la más alta para AB 1 y menor para los otros dos modos, para el mismo nivel de entrada de excitación.

1.4.8 Efectos del voltaje de suministro

Normalmente, el suministro de alto voltaje utilizado para el ánodo es un tipo simple no regulado, que utiliza un rectificador y un condensador de suavizado. Para muchas aplicaciones esto es aceptable. Si volvemos a las figuras 3.2 y 3.3 podemos ver que aunque el voltaje del ánodo puede variar en un amplio rango de voltaje, las curvas son sustancialmente rectas, casi horizontales. La mayoría de los suministros de alto voltaje de ánodo se hunden un poco en el voltaje a medida que aumenta el drenaje de corriente, debido al factor de regulación. Para una válvula de triodo, es el único voltaje de suministro requerido, además del suministro de filamento / calentador. Sin embargo, para el tetrodo y el pentodo se requiere un suministro de voltaje inferior separado y este suministro debe estar bien regulado. Lo mismo se aplica al suministro de la red de control, si no se genera por ‘autopolarización’ utilizando la corriente de la red.

Muy a menudo, el suministro de la red de la pantalla se deriva del mismo transformador que el suministro del ánodo, utilizando otro devanado secundario y componentes rectificadores. Para suministros de polarización fija, también es común usar otro devanado secundario para derivar este suministro. Como la corriente del ánodo suele ser la más grande, ya que varía, cambia los otros voltajes secundarios. Para los amplificadores lineales que utilizan válvulas de tetrodo / pentodo, esta variación en el voltaje de la rejilla de la pantalla provoca una no linealidad adicional, así como cualquier no linealidad inherente debido a las curvas de transconductancia no perfectas. Si la linealidad es crítica en estos amplificadores, se requieren estabilizadores de voltaje tanto para la red de pantalla como para los suministros de la red de control para mantenerlos dentro de límites estrechos. Este tema se tratará con más detalle más adelante.

La rejilla de la pantalla en una válvula de tetrodo / pentodo tiene casi tanto control sobre la

1.4.9 Modos de funcionamiento

El amplificador de clase B se utiliza cuando se requiere una buena eficiencia con una linealidad razonable. Se usa más comúnmente para amplificadores de audio que necesitan entregar alta potencia pero donde la distorsión no es tan importante. En la mayor parte del rango de potencia de salida, la distorsión es bastante baja y es aceptable para el propósito previsto. Un amplificador de alta fidelidad no lo es, pero cuando la distorsión no tiene que ser muy baja es suficiente.

La clase B casi siempre se usa en amplificadores de audio push-pull, ya que al operar dos válvulas en anti-fase, los productos de distorsión generados en una mitad se cancelan por una distorsión igual y opuesta en la otra mitad, al menos en teoría. Cuando se utilizan amplificadores de RF, no se necesita la operación push-pull: un circuito de un solo extremo hace todo lo que necesitamos. Esto se debe a que el circuito del tanque resonante llena el medio ciclo que falta debido al “efecto volante” de la red. Por tanto, se elimina parte de la distorsión, pero no toda.

Para obtener una verdadera operación de Clase B, la corriente inactiva de la válvula simplemente se lleva a cero ajustando la polarización de la red. En esta condición, el semiciclo positivo de la forma de onda de entrada conducirá la corriente del ánodo sobre la pendiente completa de la curva característica. Esto significa que la corriente de la red fluye sobre la parte superior del pico de la pendiente de la corriente del ánodo de la forma de onda de entrada del variador cuando la red es positiva. Esto se puede ver en la figura 5.1 .

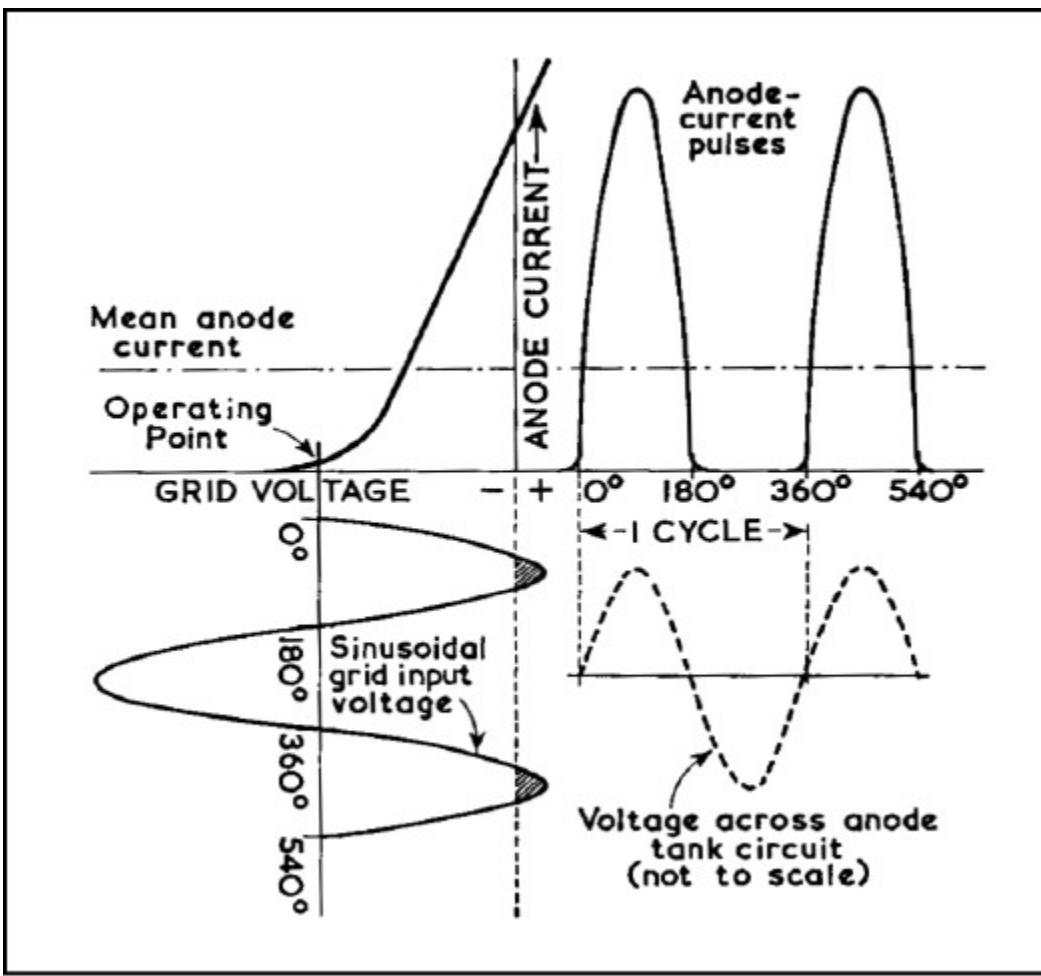


Fig 5.1: Curva

de funcionamiento de Clase B.

Aunque el caso ideal es que la corriente del ánodo comience en cero, muy a menudo esto introduce una gran distorsión para señales de entrada muy pequeñas y, por lo tanto, normalmente se eleva a aproximadamente 2 a 5% de la oscilación máxima de la corriente del ánodo para evitar este problema. La corriente del ánodo fluye por los 180° completos de la señal de entrada en el semiciclo positivo. Como puede verse, la parte inferior de la curva de transferencia está doblada y esta curvatura causa una distorsión de segundo orden, comúnmente llamada distorsión armónica. (No se muestra la parte superior completa de la pendiente, esto también tiene una parte curva similar cuando la corriente del ánodo es muy alta. La pendiente total de la corriente del ánodo tiene forma de S, siendo la parte curva superior una imagen especular de la parte inferior.) Al evitar estas regiones operativas, la distorsión se mantiene a niveles razonables. Sin embargo, muy pocos, si alguno, las válvulas tienen una pendiente ideal como se muestra. Aunque son sustancialmente una línea recta, algunas a menudo muestran una segunda curva en forma de S distinta más pequeña sobre la parte central cuando se examinan de cerca. Siempre que la desviación de la línea perfectamente recta no sea demasiado pronunciada, la distorsión no será un problema grave. Otro diagrama de Clase B (La figura 5.2) muestra la pendiente de corriente de ánodo utilizable completa con las porciones no lineales más claramente.

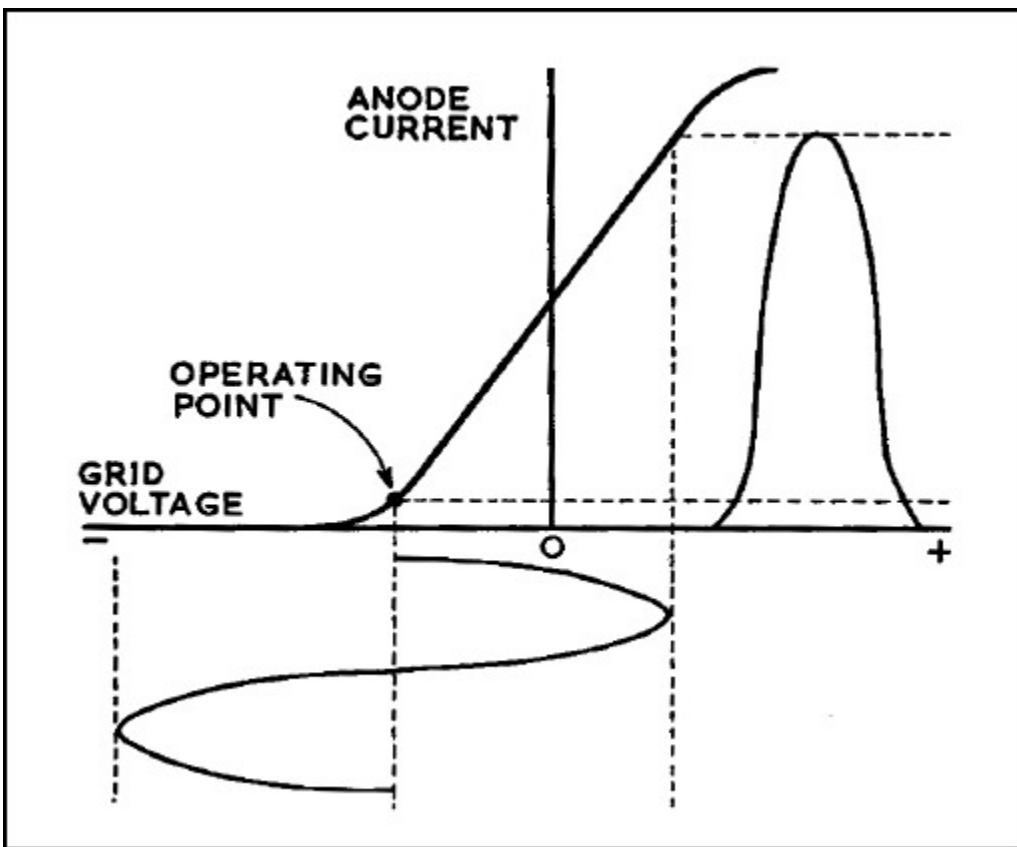


Fig 5.2: Gráfico

ampliado de la pendiente de la corriente del ánodo.

El punto de polarización óptimo se determina generalmente extendiendo la parte de línea recta hacia abajo hasta que se cruza con el eje X de polarización de la rejilla. A partir de esta estimación inicial se realizan pequeñas variaciones para optimizar la linealidad. Se observará en el segundo gráfico que cuando la señal de entrada lleva la red a 0 V, interseca la pendiente de la corriente del ánodo en la región del 50% de la corriente máxima del ánodo utilizable. Esto indica que se ha alcanzado el punto de polarización óptimo y, por lo tanto, se puede alcanzar la máxima potencia sin distorsión. Otro método para encontrar el punto de polarización óptimo es ajustar el voltaje de la red hasta que sea cero. Si la pendiente es como se muestra arriba, la corriente del ánodo estará exactamente al 50% del valor pico.

La potencia de excitación requerida para un amplificador de Clase B es bastante alta ya que la válvula consume la corriente de la red durante una gran parte del ciclo de entrada y, por lo tanto, la fuente de excitación debe poder suministrar suficiente oscilación de voltaje de la red sin una caída en la amplitud de la señal. Esto implica una fuente con una impedancia de salida muy baja. Para garantizar que no se produzca una distorsión de la forma de onda de la señal de entrada, esto a menudo significa que la fuente de activación debe poder suministrar una potencia mucho mayor de la que realmente se necesita para hacer oscilar el voltaje de la red en el rango requerido.

1.4.10 Derivación de la eficiencia de clase B

Terman derivó la eficiencia de una válvula ideal que opera en Clase B al amplificar una forma de onda sinusoidal. La máxima eficiencia posible es $\frac{\pi}{4}$ (78,5%). Esto supone que la válvula puede hacer oscilar el voltaje del ánodo desde el voltaje de suministro del ánodo hasta cero voltios. Sin embargo,

ninguna válvula fabricada puede hacer esto. Por lo tanto, la ecuación completa se modifica con el término $(V_{a(min)}/V_{fuente})$. La fórmula completa es, por tanto:

$$\eta = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{V_{a(min)}}{V_{fuente}}\right)$$

Para el caso de una válvula de rejilla de pantalla (tetrodo, haz-tetrodo, pentodo, etc.), la limitación de cuán baja V_a min puede ser definida por el voltaje en la rejilla de pantalla (V_{g2}). En caso de que el voltaje del ánodo baje o disminuya, se producirá una distorsión V_{g2} . Por lo tanto, si se considerara una válvula que opera con un suministro de ánodo de 750V y un suministro de pantalla de 250V, la eficiencia máxima no puede ser mayor que:

$$\eta = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{V_{a(min)}}{V_{fuente}}\right)$$

$$0,785(1 - 0,333) = 0,523(52,3\%)$$

Por lo tanto, para una máxima eficiencia, el suministro de V debe ser mucho mayor o V_{g2} debe ser menor.

En la práctica, las cifras de eficiencia típicas son más como el 60% para la caja de válvula ideal a bajas frecuencias, como el audio, y cuando se agregan pérdidas de circuito, se logrará algo menos en la práctica. Si la forma de onda se distorsiona, ya no se comporta como una verdadera onda sinusoidal y es necesario modificar la ecuación. Esto significa que las mediciones de eficiencia aparente mejor se deben normalmente a alguna distorsión que ocurre en la forma de onda de salida.

Cabe señalar que si el amplificador solo se lleva a la mitad de su potencia potencial, la eficiencia será la mitad de la eficiencia máxima calculada, por lo que es de esperar alrededor del 30%. Esto está directamente relacionado con el término $V_{a(min)}/V_{fuente}$. Si $V_{a(min)}$ solo se reduce a la mitad del valor total (500V en lugar de 250V), el término (suministro de 1 - V_a min / V) se reduce. En el ejemplo anterior, la eficiencia será 26%.

Otro factor es cuánto cae el voltaje de suministro del ánodo por debajo de la corriente máxima del ánodo, si esto es más que un pequeño porcentaje, mejora ligeramente la eficiencia, ya que el valor del suministro V se toma en el caso de la corriente pico del ánodo (I_{max}) cuando se alcanza $V_{a(min)}$. Por lo tanto, no se le da tanta importancia a la regulación de la fuente de alimentación para amplificadores de Clase B.

La potencia de salida posible para válvulas ideales en un amplificador de clase B push-pull viene dada por:

$$P_o = \left(\frac{I_{max}V_{fuente}}{2}\right) \left(1 - \frac{V_{a(min)}}{V_{fuente}}\right)$$

Donde I_{max} es la corriente máxima del ánodo en cada válvula.

Nuevamente, no se han considerado pérdidas en el circuito, lo que disipará parte de la potencia de salida potencial.

1.4.11 Clase AB

Para mejorar la linealidad y disminuir la potencia de accionamiento requerida, a menudo se usa un cambio en el método de polarización. Esto ahora se convierte en una mezcla de la Clase B y la Clase A más lineal y, por lo tanto, se llama Clase AB. En este método de polarización, la válvula se comporta como un tipo de Clase A a niveles de control de entrada pequeños y se mueve hacia la

Clase B más eficiente a medida que aumenta la señal de entrada. Hay dos tipos distintos de Clase AB, uno en el que no fluye corriente de red y el otro donde hay algo de corriente de red.

El primer tipo se conoce como Clase AB y se comporta más como un verdadero amplificador de Clase A en un rango más amplio de corriente de ánodo. La penalidad que pagamos es que la disipación del ánodo es mayor que la de la Clase AB 2 y la corriente inactiva es mucho mayor. Por tanto, la eficiencia es menor que AB 2 .

En la Clase AB 2 se utiliza la misma pendiente del ánodo pero la corriente inactiva es más alta que la Clase B normal. Esto significa que la disipación total del ánodo es mayor y, como tal, no podemos obtener la misma potencia pico sin exceder la clasificación de disipación del ánodo. Sin embargo, para un tipo de señal de entrada intermitente como SSB, esto no es una limitación seria.

El factor decisivo de si es AB 1 o AB 2 es si fluye alguna corriente de red. Si la corriente de la red no fluye sobre ninguna parte de la forma de onda de entrada, es Clase AB 1 . Si alguna corriente de la red fluye sobre una parte sustancial de la forma de onda de entrada, es AB 2 . Desafortunadamente, hay muchas permutaciones en este método y si ocurriera una pequeña cantidad de corriente de red justo en el pico de la forma de onda de entrada estrictamente hablando, tiene que clasificarse como AB 2 , cuando en realidad para el 99,9% del ciclo de entrada no flujos de corriente de red. Esto llevó a algunos a llamarlo Clase AB 1.5 , lo cual es una tontería.

Muchas de las válvulas de tetrodo populares para amplificadores de RF muestran una mejora pequeña pero significativa en los productos IMD si fluye un poco de corriente de red, a pesar de que están polarizadas en Clase AB 1 . El gráfico de las dos clases se muestra en la figura 5.3 . Como se puede ver, el modo AB 2 necesita más señal de excitación, pero hace que la corriente del ánodo ascienda por la pendiente y, por lo tanto, permite más potencia de salida. Aunque la Clase AB 2 hace correr la corriente del ánodo más arriba de la pendiente de la corriente del ánodo, luego comienza a acercarse a la región de curvatura superior. Cuanto más empujamos la corriente del ánodo hacia arriba de la pendiente, mayores son los productos de distorsión generados debido a la inclinación de la pendiente en la parte superior.

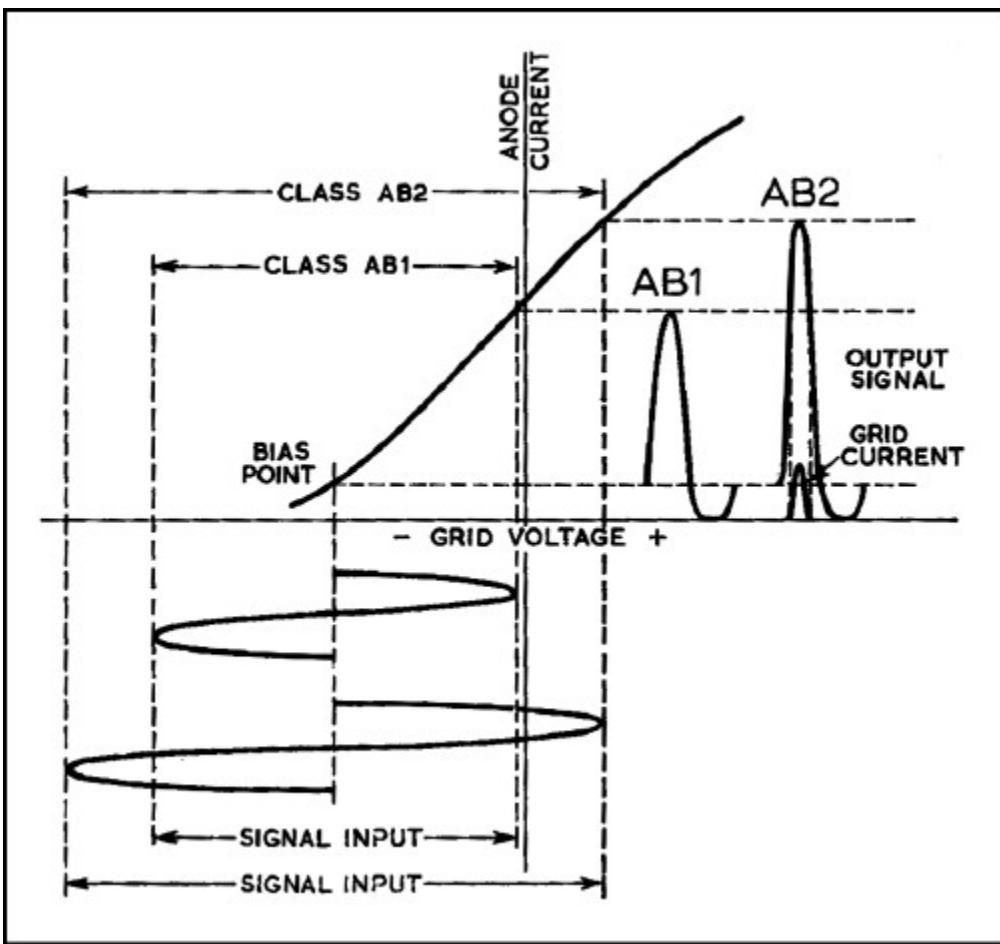


Fig 5.3: Tipos de clase AB.

Hasta dónde podemos empujar la corriente dependerá de si los productos de distorsión de intermodulación (IMD) siguen siendo aceptables o si estamos excediendo la corriente de ánodo segura y la clasificación de disipación de la válvula. Es tentador seguir empujando la corriente hacia arriba, pero hay un límite superior finito que no debemos sobrepasar. Si son los IMD o la disipación lo que dicta el máximo dependerá de la válvula y del voltaje del ánodo utilizado. Por lo general, la figura IMD entra primero y empujar la unidad hacia arriba generará una salpicadura excesiva.

1.4.12 Limitaciones de la válvula Tetrode

El tipo de rejilla de la pantalla de válvulas como tetrodes, pentodes y tetrodes de haz tienen un problema inherente particular cuando se polarizan para Clase B, AB 1 y AB 2. Si se examina el gráfico de la figura 5.4, se muestra una versión ampliada de la parte inferior de la curva de transferencia de corriente del ánodo.

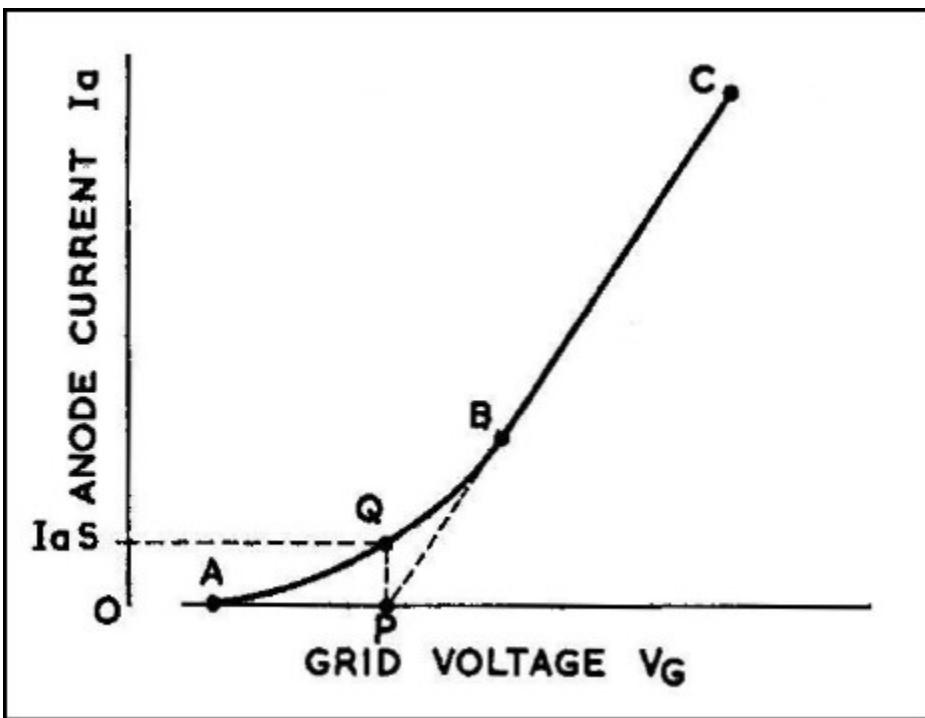


Fig 5.4: Diagrama de

curvatura de la curva de transferencia inferior.

El punto P en el eje de voltaje de la red denota el punto de polarización ideal. En este punto de polarización, la corriente del ánodo inactivo o en reposo es I_{aS} en el eje Y de la corriente del ánodo. Esto se corresponde con el punto Q en el medio de la curvatura en el extremo inferior de la curva de transferencia de corriente del ánodo. La corriente máxima del ánodo lineal se indica con el punto C. La curvatura superior no se muestra en el diagrama.

La verdadera parte en línea recta de la pendiente de transferencia del ánodo comienza en el punto B. Aquí es aproximadamente donde un amplificador Clase AB 1 estaría polarizado; sin embargo, la polarización elegida es para la Clase AB 2 ya que proporciona una mejor eficiencia y potencia de salida. Entre los puntos A y B, la curva es predominantemente de segundo orden e introducirá la generación de distorsión armónica. Sobre la mayor parte de la pendiente del ánodo, desde B es una línea recta, por lo que es sustancialmente lineal. Para una verdadera operación de Clase B, el punto de polarización correcto sería el punto A. Pero esto introduce más distorsión y, a menudo, necesita estar más alineado hacia el punto Q. Un punto de polarización a medio camino entre A y Q generalmente se elige como un compromiso cuando las válvulas de rejilla de pantalla son usadas.

Las válvulas de rejilla de pantalla, como un tetrodo de haz, son sensibles al voltaje de la rejilla de pantalla. Si las curvas de corriente constante del ánodo se examinan en detalle para diferentes voltajes de la rejilla de la pantalla, la relación entre la corriente del ánodo y el voltaje de la rejilla de la pantalla se puede representar en un gráfico separado. Muestra que la corriente del ánodo depende en gran medida del voltaje de la rejilla de la pantalla y tiene una ley de $3/2$. Esto significa que si el voltaje de la rejilla de la pantalla se eleva de, digamos, 300 V a 500 V, la corriente del ánodo se duplica para el mismo voltaje de la rejilla de control y voltaje del ánodo. La razón por la que esto ocurre es que la rejilla de la pantalla actúa como un mejor acelerador de los electrones del cátodo que fluyen hacia el ánodo.

Para corregir esto, la corriente del ánodo debe reducirse para mantener la corriente y la disipación del ánodo dentro de los límites seguros para la válvula. El aumento del voltaje de polarización de la

red puede hacer esto, de modo que sea más negativo. Esto restaura la corriente inactiva de nuevo al valor requerido y la coloca firmemente en la parte inferior de la curva de transferencia del ánodo inferior en el punto Q. Como el voltaje de la red ahora es mucho más alto, se requiere un voltaje de conducción de la red mayor y, a medida que la corriente de la red fluye por debajo Operación AB 2 , esto significa que se requiere un nivel de accionamiento más alto.

Esto va en contra de todo el razonamiento aparente de aumentar el voltaje de la red de la pantalla para obtener más ganancia y potencia de salida. La potencia de salida de primer orden es la oscilación del voltaje del ánodo y la capacidad de la válvula para extraer suficiente corriente. Si el voltaje del ánodo es bajo, la oscilación del voltaje del ánodo y la corriente también serán bajos para la misma señal de excitación. Para una válvula típica, si el voltaje del ánodo se eleva de 1 kV a 2 kV, la potencia de salida potencial aumenta en un factor de cuatro.

El otro gran problema de aumentar el voltaje de la rejilla de la pantalla es que el voltaje del ánodo no puede oscilar mucho por debajo del voltaje de la rejilla de la pantalla. Si el voltaje del ánodo oscila por debajo del voltaje de la rejilla de la pantalla, existe un cátodo virtual, la rejilla de la pantalla intenta asumir el papel del ánodo y consume una corriente de pantalla excesiva. Esta corriente de ánodo desviada hace que la forma de onda de voltaje del ánodo se aplana en la parte superior, ya que la corriente de ánodo no puede oscilar lo suficiente para seguir la forma sinusoidal correcta. El resultado es que se generan productos de distorsión cuando esto ocurre.

Al aumentar el voltaje de la rejilla de la pantalla, llega el punto en el que puede hacer oscilar el voltaje del ánodo hacia abajo a un voltaje más alto y, por lo tanto, limita la corriente del ánodo que es posible extraer sin que fluya una corriente excesiva de la rejilla de la pantalla. Reducir el voltaje de la rejilla de la pantalla tiene el efecto contrario. El ánodo ahora puede bajar el voltaje antes de alcanzar el voltaje de la rejilla de la pantalla. Este efecto fue aprovechado en el amplificador lineal G2DAF, que cubriremos más adelante.

1.4.13 Clase C

Aunque el amplificador de Clase C no es adecuado para modos que requieren una curva de transferencia lineal, tiene sus usos para transmisores modulados por ánodo AM, así como para modos FM y CW. La base de funcionamiento es que la corriente del ánodo se corta por un gran voltaje de rejilla negativo y la corriente del ánodo solo fluye en pulsos estrechos para una parte de la forma de onda de la señal de rejilla positiva. La curva de transferencia de corriente del ánodo se muestra en la Fig . 5.5 .

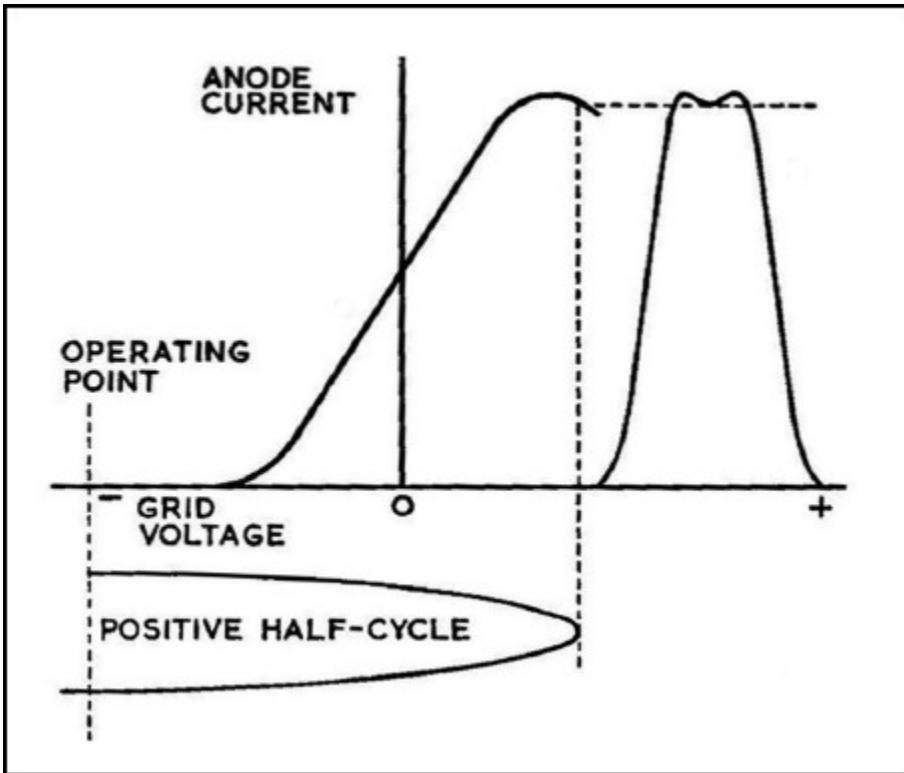


Fig 5.5: Curva de corriente del ánodo de clase C.

Normalmente, la polarización de la red se establece en aproximadamente el doble del valor requerido para simplemente cortar la corriente del ánodo. Esto significa que en la mitad positiva de la señal de activación de entrada no fluye corriente de ánodo hasta que el voltaje de la red se acerca al punto de cátodo de la red de 0V. Una vez que se ha superado el punto de 0 V, la corriente del ánodo se conduce directamente a la parte superior de la pendiente y por encima de la parte superior en una pequeña cantidad. Esto coloca la corriente del ánodo en saturación y cualquier pequeña variación en el nivel de la señal de entrada tiene poco efecto sobre la corriente del ánodo y, por lo tanto, la potencia de salida.

La potencia de conducción de la red es el más alto de todos los modos de funcionamiento, pero como la resistencia de la red es bastante alta, la potencia requerida no es excesiva. La ganancia que puede producir un amplificador de potencia de Clase C típico es de alrededor de 20 veces (13 dB) a alrededor de 40 veces (16 dB), dependiendo de la frecuencia y el nivel de salida de potencia. La corriente de la red es bastante alta y, por lo tanto, es esencial una válvula diseñada para atender esta alta corriente. Afortunadamente, a los niveles de potencia que utilizan los aficionados, esto significa que muchas válvulas normales pueden funcionar en Clase C sin problemas graves. Sin embargo, hay algunas válvulas que no deben usarse con una corriente de red alta, ya que la estructura de la red puede dañarse.

De todas las clases operativas, la Clase C tiene la mayor eficiencia y es común una cifra del 75% o un poco más alta. En un circuito de ánodo realmente eficiente es posible ver cifras un poco por encima del 80% a bajas frecuencias.

Aunque los pulsos de corriente del ánodo son mucho menores que los 180 de la señal de entrada y, por lo tanto, son ricos en armónicos, el circuito del tanque del ánodo resonante restaura la forma de onda de la señal de entrada a una forma de onda sinusoidal casi perfecta debido al efecto de

volante. Solo existen armónicos de la frecuencia fundamental en el ánodo. Estos son suprimidos en gran medida por el circuito del tanque cargado Q, y cualquier supresión adicional se puede realizar con un filtro de paso bajo conectado en serie con la salida si se considera que son excesivos. En un circuito de tanque correctamente proporcionado, cuando el circuito del ánodo entra en resonancia, los armónicos normalmente disminuyen cuando el circuito del tanque se ajusta a la potencia de salida máxima.

El tema de los circuitos del tanque de ánodo y la necesidad de seleccionar el valor correcto de Q cargado se tratan más adelante en otro capítulo.

1.4.14 Controlar la potencia de salida de RF

En el amplificador de Clase C, el método normal para impulsar la rejilla de un tetrodo de haz es suministrar un nivel de portadora fijo desde la etapa de activación. La polarización de la red puede ser mediante un suministro de polarización fijo, que tiene alguna variación para establecer el voltaje de corte correcto, o para utilizar la corriente de la red que fluye en una resistencia conectada desde la red a tierra. De los dos, este es el método más simple. Dado que la corriente del ánodo depende del voltaje de polarización de la red, si se elimina la señal de excitación, el voltaje de la red aumenta a 0 V y la corriente del ánodo aumentará al máximo, ya que el voltaje de polarización de la red desarrollado a través de la resistencia de la red ha desaparecido.

Para evitar esta condición, un método común con los transmisores de CW es disponer algún método de modo que si la polarización de la red falla, el voltaje de la pantalla se lleva a un voltaje bajo, reduciendo así la corriente del ánodo a un nivel bajo. Esta técnica se llama etapa de sujeción . En la figura 5.6 se muestra una etapa de sujeción simple que usa un triodo para controlar el voltaje de la rejilla de la pantalla del amplificador de RF .

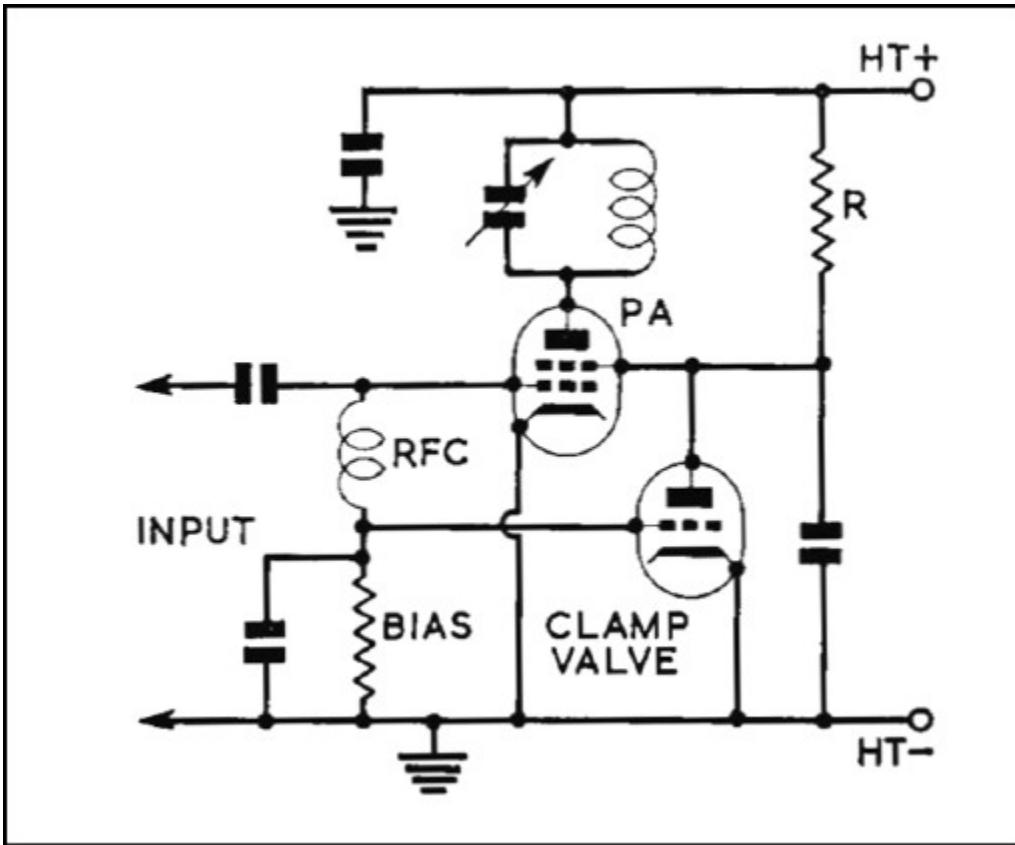


Fig 5.6: Circuito de pinza simple.

La válvula de triodo conectada a la rejilla de la pantalla del amplificador de RF reduce el voltaje cuando conduce completamente. Cuando la señal de excitación se aplica a la red de la etapa de salida, la polarización de la red negativa desarrollada desvía el triodo y el voltaje de la red de la pantalla se eleva al máximo establecido por la resistencia R del suministro de alto voltaje. Cuando la llave está hacia arriba, no hay polarización de rejilla disponible y la válvula de abrazadera tira de la rejilla de la pantalla hacia abajo para cerrarla a tierra, reduciendo la corriente del ánodo de la válvula de PA a un valor seguro. Cuando se desea una salida de RF variable, una pequeña modificación permite cierta variación del voltaje de la pantalla y, por lo tanto, de la corriente del ánodo, y esto se muestra en la figura 5.7 .

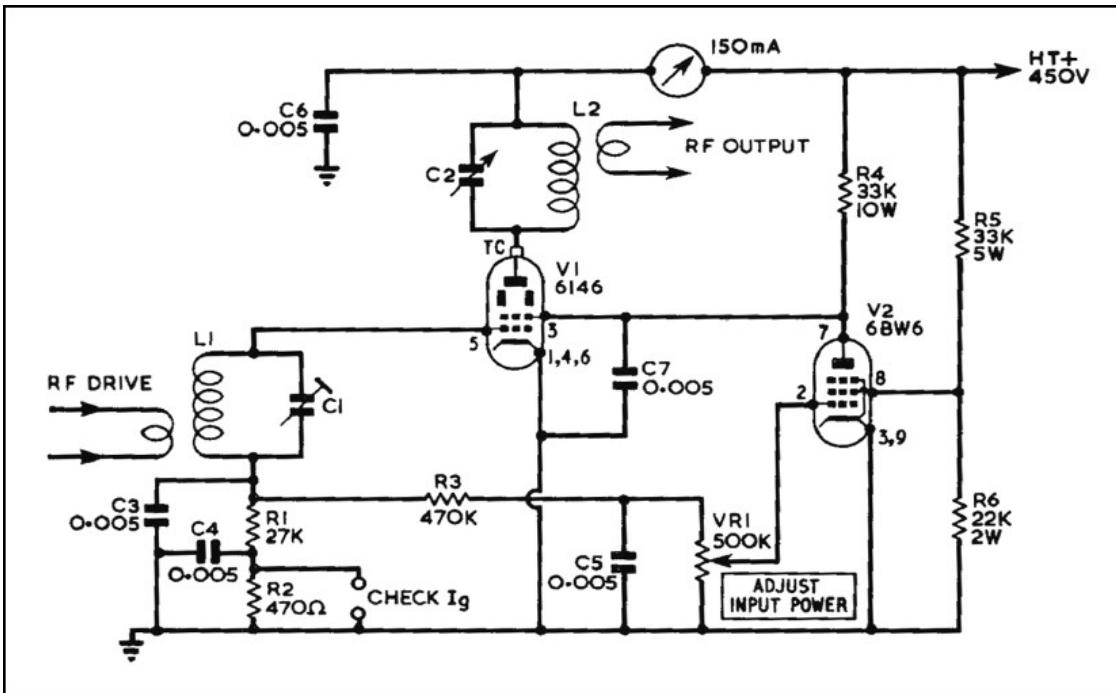


Fig. 5.7:

Circuito de pinza con control de salida variable.

La válvula de abrazadera es un pentodo de haz pequeño y la polarización de la rejilla desarrollada en V1 se alimenta a través de un recipiente de ajuste de nivel a la rejilla de V2. Al ajustar VR1, el voltaje de la rejilla de la pantalla aplicado a V1 se puede configurar para adaptarse a la potencia de salida requerida. Usando una disposición como este circuito, la salida de RF se puede variar entre aproximadamente un 10% y el máximo que puede entregar el amplificador.

1.4.15 Capacidad de salida de potencia de una válvula

Una pregunta que se hace a menudo es: “¿Cuánta potencia de RF puedo obtener de una válvula en particular?” La respuesta simple es: “Depende del tipo de amplificador que desee utilizar y de la frecuencia de funcionamiento”. Es importante comprender cómo se clasifican las válvulas en cuanto a potencia. En elementos tales como motores de combustión interna y motores eléctricos, la forma general de calificarlos es cotizar la potencia de salida en caballos de fuerza o kilovatios. Las válvulas generalmente no se clasifican de esta manera, aunque el fabricante a menudo dará un ejemplo para mostrar su capacidad. Las válvulas se clasifican en lo que no pueden entregar como potencia. Aunque esta parece una forma extraña de calificarlos, es por una razón muy lógica. La razón se debe a la eficiencia con la que la válvula se puede operar de manera segura en un circuito práctico.

1.4.16 Eficiencia

La eficiencia es la medida de cuánta potencia de salida podemos lograr para una determinada cantidad de potencia de entrada. Se da en términos porcentuales. Si toda la potencia de CC alimentada a una válvula estuviera disponible en alguna otra forma, por ejemplo, audio o potencia de RF, entonces tendría una eficiencia del 100%.

La Ley de Conservación de Energía establece que: “La energía no se puede crear ni destruir. Solo se puede convertir de una forma a otra”. El quid de esta ley es que, aunque la potencia de salida

es diferente a la potencia de entrada, siempre se puede explicar la diferencia entre las dos.

En una válvula, o cualquier otro dispositivo que convierte la energía en que la energía hacia fuera, la diferencia se encuentra por lo general para ser calor generado dentro del dispositivo durante el proceso de conversión. En las válvulas, esto se denomina disipación del ánodo y se expresa en vatios. La potencia de CC alimentada al dispositivo que no se pudo convertir en potencia de salida del tipo requerido aparece como calor. Solo se ‘ pierde’ en la medida en que no tiene la forma que nos gustaría: se contabiliza completamente como energía térmica. La eficiencia (η) generalmente se considera que es:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{DC}}$$

Si se alimenta una potencia de entrada de $P_{CC} = 150W$ a un amplificador y aparece una potencia de $P_o = 100W$ en la salida, la eficiencia es del $\eta = 66,66\%$.

Disipación de ánodo La gran mayoría de la energía perdida se atribuye a ser consumida por el ánodo. Esto no es estrictamente cierto: algunos pueden usarse para calentar otras partes de la válvula, pero el concepto es una forma viable de expresar el mecanismo. Si no se perdiera energía en el ánodo, entonces el proceso de conversión sería perfecto y la eficiencia sería de 100%\$.

La cantidad de energía que una válvula en particular puede convertir de la potencia de entrada de CC a la potencia de salida útil está determinada únicamente por la disipación segura del ánodo de la válvula. Si la potencia que se está disipando es muy superior a la clasificación máxima del fabricante, se sobrecalentará y dañará la válvula. La válvula solo puede deshacerse de la energía térmica hasta una cierta velocidad, transfiriendo la energía térmica a otro objeto. El enfriamiento del ánodo y otras partes de la válvula es, por lo tanto, un factor importante para determinar cuánta disipación del ánodo es posible.

Calcular la potencia de salida de la disipación del ánodo

La fórmula para convertir la clasificación de disipación del ánodo en vatios en potencia de entrada utiliza la fórmula:

$$P_{in} = P_{diss}(1 - \eta)$$

Dónde:

P_{dc} es la entrada de energía de CC en vatios

P_{diss} es la disipación nominal del ánodo

η es la eficiencia numérica (por ejemplo, 75% = 0,75).

Para una válvula como la RCA-811, la disipación máxima del ánodo es de 45W. Suponiendo una eficiencia de ánodo del 75% para un amplificador de audio de Clase B, puede manejar con seguridad una entrada de CC de 180 W.

La potencia de salida es simplemente la potencia de entrada multiplicada por la eficiencia:

$$P = 180W \cdot 0,75 = 135W$$

La disipación del ánodo es (entrada de potencia - salida de potencia) es

$$P_{diss} = (180 - 135) = 45W.$$

Esto supone que la salida de potencia es continua. Cuando la salida no está al 100% del valor nominal, se puede aplicar una reducción inteligente para obtener una condición de trabajo segura. A esto lo llamamos ciclo de trabajo .

1.4.17 Ciclo de trabajo

En el caso del código Morse, la relación entre puntos y espacio es 1:1, por lo que si se transmite una cadena de puntos, el transmisor está encendido la mitad del tiempo y apagado durante el resto. Por tanto, el ciclo de trabajo es del 50. Bajo esta condición, usando el ejemplo anterior, se podría duplicar de manera segura para la entrada de CC y la potencia de salida de RF sin exceder la disipación del ánodo de 45 W. La disipación citada es el valor promedio , por lo que aunque durante la transmisión del punto se disipa el doble de su disipación nominal, durante el período espacial la disipación es cero. Tiene un período de reposo donde el calor puede ser transportado.

En el radar y transmisores pulsados similares, el nivel de potencia es muy alto durante el pulso de transmisión, pero el tiempo entre pulsos es largo. Por lo tanto, la válvula tiene tiempo suficiente para alejar el calor y la disipación promedio del ánodo es baja.

Al evaluar hasta dónde se puede empujar la envolvente antes de que la válvula se someta a una tensión indebida, necesitamos conocer el ciclo de trabajo de los diversos modos de uso común. Para el código Morse, si se transmite una cadena de guiones, el tiempo de activación es el 75% del tiempo total, porque la relación de guiones a espacio es 3:1. Por lo tanto, en este modo solo podríamos aumentar la potencia de entrada de CC en 1,33.

Para FM, donde la portadora está al 100% durante las transmisiones, claramente la disipación del ánodo de 45 W es el factor determinante y funcionar a más de la potencia de entrada de CC segura sería inaceptable.

Para la operación de banda lateral única, la voz promedio tiene un ciclo de trabajo de entre el 30 y el 40% de los picos, por lo que la clasificación podría aumentarse bastante antes de que se exceda la disipación promedio del ánodo. Sin embargo, si se usa un procesador de voz, esto aumenta la amplitud de voz promedio a aproximadamente un 60% y dicta la cantidad de energía adicional que podemos ejecutar con seguridad.

Sin embargo, los transmisores de aficionados normalmente no funcionan de forma continua: tienen períodos cortos de transmisión y aproximadamente el mismo período de recepción, por lo que la potencia máxima podría aumentarse un poco. Si el equipo se usa en un concurso, las cosas son muy diferentes, especialmente si se usa un procesamiento de voz pesado. Estos factores determinan cuánto ‘abuso inteligente’ es capaz de tolerar la válvula.

1.4.18 Eficiencia potencial del ánodo

Varias fuentes han calculado a partir de los primeros principios cuál puede ser la eficiencia máxima del ánodo para los diversos modos de conducción de uso común. Los modos de funcionamiento más populares son Clase A, Clase B y Clase C. A estos se añaden otras dos variaciones de Clase AB 1 y Clase AB 2 , que son combinaciones de Clase A y B. El modo de funcionamiento que se utilice dependerá de la aplicación y otros factores.

Terman primero calculó estos valores máximos y varios otros han confirmado que los valores son el límite superior para una válvula ideal. Sin embargo, nadie hace una válvula ideal, solo están

disponibles válvulas prácticas. Por lo tanto, aunque útil, es simplemente una guía sobre la máxima eficiencia absoluta que sería posible lograr si estuviera disponible la válvula ideal.

Generalmente, la eficiencia del ánodo disminuye a medida que aumenta la frecuencia, por lo que un valor para un amplificador de audio siempre será mejor que un amplificador de HF y un amplificador de VHF / UHF. Por lo general, no es posible citar las hojas de datos de las válvulas de los fabricantes para los tres tipos de operación, ya que una válvula en particular no está hecha para atender a todos los tipos. Sin embargo, existen datos suficientes para operar en áreas de frecuencia, por ejemplo, audio y RF baja o HF y UHF.

Una válvula típica de alta potencia a frecuencia de audio se acercará al valor teórico pero se quedará corta por una pequeña cantidad. De manera similar, una válvula de microondas a baja frecuencia de RF es notablemente mejor que en el rango superior en las bandas de microondas. El triodo 2C39A a 3GHz tiene una eficiencia de aproximadamente 25 a 30% en el mejor de los casos para operación de Clase C, a 144MHz su eficiencia es de alrededor del 70% y a 432MHz es típicamente del 60%. Esta tendencia es común para todas las válvulas. Pueden indicarse valores teóricos típicos para las distintas condiciones de funcionamiento:

La clase C tiene la más alta al $\eta = 84\%$;

La clase B es la siguiente mejor con $\eta = 78,5\%$;

La clase A es la mas baja en alrededor del $\eta = 50\%$.

Los modos intermedios de la Clase AB 1 y AB 2 son similares, la Clase AB2 es ligeramente mejor al 65% y la Clase AB1 al 55%. Sin embargo, debe repetirse que estos son los valores teóricos máximos cuando se opera a bajas frecuencias . A mayor frecuencia, estos valores son más bajos, ¡a veces mucho más bajos! Generalmente, cuanto mayor es la linealidad del amplificador, menor es la eficiencia potencial.

1.4.19 Eficiencia del circuito

La eficiencia general de un amplificador de potencia no está completamente determinada por la eficiencia del ánodo de la válvula. Hay otros factores que agregan una pérdida adicional al proceso de transformación de la entrada de CC a la salida de RF. El factor principal es la pérdida inherente en la red de ánodos. A frecuencias de audio y RF bajas, estas pérdidas son bastante pequeñas y, a menudo, pueden ignorarse. Este no es el caso cuando la frecuencia es muy alta. En UHF y por encima de la red de ánodo, las pérdidas pueden ser significativas y pueden consumir la energía disponible para alimentar la antena.

Como ya se ha mencionado, los fabricantes de válvulas suelen proporcionar dos medidas de salida de potencia de RF diferentes en sus hojas de datos. Estos son la potencia de ánodo disponible y la potencia de salida útil . El primero de ellos es la potencia calculada que sale del ánodo, el otro es la potencia real medida en el conector de salida del amplificador. La diferencia entre los dos es la potencia perdida en la red de transformación del ánodo, que se puede medir sin la válvula en el circuito.

1.4.20 Enfriamiento

El enfriamiento es una de las áreas más críticas en cualquier diseño de amplificador de alta potencia. Si el calor generado en la válvula no se elimina con la suficiente rapidez, superará la temperatura de funcionamiento segura.

Cuando se diseña una válvula, el fabricante decide el método de enfriamiento óptimo para adaptarse a la aplicación que probablemente se utilizará. Para el tipo de válvulas de envoltura de vidrio más pequeñas, a menudo el enfriamiento por convección simple es suficiente para mantener la válvula por debajo de cierta temperatura máxima. Para válvulas grandes y de mayor potencia, la envolvente tiene un área de superficie mayor y, a veces, el enfriamiento por convección es adecuado. Las válvulas de envoltura de vidrio disiparán el calor más fácilmente si se les aplica una suave corriente de aire frío. A menudo, el volumen de aire requerido no es grande y esto es suficiente para enfriar la válvula. En otros, se fabrican chimeneas de vidrio especiales que encajan sobre la válvula y se sopla un mayor volumen de aire desde debajo de la válvula para formar un método de transferencia de calor eficiente.

Para las válvulas físicamente pequeñas, donde el área disponible es pequeña, a menudo se instala un radiador de enfriamiento con aletas en el ánodo y se fuerza aire a través de él para mantener el ánodo a una temperatura segura. En otras válvulas de alta potencia, la refrigeración por aire simplemente no es suficiente y se instalan camisas de refrigeración líquida para transportar el calor.

Si la velocidad a la que el calor puede ser transportado y disipado es mucho mayor de lo que genera la válvula, entonces es factible aumentar la disipación del ánodo a un nivel mucho más alto. La serie 2C39 de triodos de microondas está equipada con un enfriador de ánodo con aletas que permite una disipación máxima de ánodo de 100W. Sin embargo, es sencillo reemplazar este enfriador de aletas con una camisa de enfriamiento líquido. Con un sistema de refrigeración líquida, la disipación del ánodo se puede aumentar hasta cuatro veces más que la refrigeración por aire normal.

Eficiencia real Aunque el cálculo de la eficiencia es un factor fácil de determinar, nos puede sorprender que lo que logremos en la práctica sea mucho menor de lo esperado. Es fácil medir la potencia de entrada de CC: simplemente mida la corriente del ánodo y el voltaje y multiplique los dos. También es sencillo medir la salida de potencia de RF utilizando un vatímetro calibrado. Pero hay casos en los que obtenemos resultados inesperados.

Suponga que el amplificador en uso tiene una eficiencia conocida del 60% cuando se conduce a su salida nominal completa. El modo de funcionamiento es el código Morse. Cuando el amplificador se cambia al modo de transmisión, pero antes de presionar la tecla, muestra algo de corriente inactiva en el medidor de corriente del ánodo y, por supuesto, el vatímetro de RF muestra una salida cero. ¿Cuál es la eficiencia en esta condición? La respuesta es 0%, porque aunque el amplificador está consumiendo energía, no hay energía de salida.

Ahora supongamos que enviamos una larga cadena de puntos que están correctamente espaciados con la longitud del punto siendo el mismo período de tiempo que el período de espacio. ¿Cuál es la eficiencia ahora? Cuando la tecla está presionada, el amplificador suministra toda la potencia a la eficiencia medida, por lo que está funcionando al 60% de eficiencia. Pero en el tiempo de funcionamiento clave tiene una eficiencia del 0%. Por tanto, la eficiencia media es el máximo dividido entre dos o 30%. Lo mismo se aplica a la potencia de salida media. Cuando la tecla está presionada, transmite, digamos, 100W, pero con la tecla hacia arriba es, por supuesto, cero potencia. Por tanto, la potencia media es de 50 W.

Si ahora enviamos una larga serie de guiones, y nuevamente asumimos que se observa el período correcto del guión al espacio, ¿cuál es la cifra de eficiencia en esta condición? El período del guión de tecla hacia abajo es tres veces más largo que el período de espacio, por lo que el ciclo de trabajo es del 75%. Por tanto, la eficiencia media es del $60\% \times 0,75 = 45\%$. La potencia media es de 75 W.

Cuando se utiliza SSB como entrada, se aplica el mismo argumento. La SSB con voz humana tiene un ciclo de trabajo de aproximadamente un 30% de relación promedio a pico. Entonces, la eficiencia promedio que logramos es $60\% \times 0.3 = 18\%$. Aunque esto suene terrible, debe verse en el contexto correcto. Bajo esta condición de operación, la disipación del ánodo también promedia solo el 30% de la condición de llave completa. Para un modo como FM, donde la portadora está al 100% de la potencia, la disipación del ánodo es la máxima.

Máxima eficiencia En un amplificador de RF, la red de adaptación del ánodo normalmente se ajusta para entregar la máxima potencia cuando la válvula está completamente accionada. Esto significa que cuando la válvula no se acciona hasta su potencia máxima de entrada, la eficiencia se ve afectada. Esto se debe a que la combinación se ha ajustado para adaptarse a la potencia máxima, en salidas de potencia más bajas, la válvula ahora no está correctamente emparejada para entregar la potencia potencial total. Esto escala casi linealmente en amplificadores prácticos. Al igual que con el ejemplo de puntos de código Morse anterior, se aplica el mismo efecto.

Si la válvula solo se acciona para dar la mitad de la potencia máxima, la eficiencia cae al 50% de lo que sería a plena potencia máxima. Si la eficiencia máxima es del 60%, la válvula solo ofrece un 30% de eficiencia para esa entrada de alimentación de CC en particular. Por lo general, esto no es un problema, ya que la clasificación de disipación segura del ánodo es mucho más alta a máxima potencia. Podemos trazar la curva de eficiencia contra la entrada de energía y es esencialmente una línea recta que comienza en 0% y alcanza el punto de eficiencia máxima en la parte superior de la línea.

Disipación de ánodo en condiciones inactivas La disipación permitida del ánodo cuando una válvula está polarizada en un modo lineal es motivo de preocupación. Normalmente, la corriente inactiva se establece en un valor bastante alto, de modo que la válvula en condiciones de baja transmisión funciona en Clase A. A medida que la transmisión aumenta gradualmente, se mueve a la región de operación de Clase B. El modo de funcionamiento con la corriente inactiva más alta es la Clase AB 1 . Encontrar la corriente inactiva óptima es a menudo una cuestión de experimentación. Por un lado, deseamos tener una buena linealidad a niveles de excitación pequeños, pero la disipación del ánodo es una preocupación. Si reducimos la corriente inactiva, reducimos la disipación del ánodo, pero podemos reducir la linealidad para niveles de excitación pequeños. Afortunadamente, Eimac encontró la respuesta definitiva a este problema.

Eimac recomienda que cuando una válvula está polarizada para la Clase AB 1, la corriente inactiva debe establecerse de modo que el nivel de disipación del ánodo sea solo del 80% de la disipación máxima del ánodo de la válvula. Esta es la mejor configuración de compromiso. Esto significa que para una válvula con una disipación máxima de ánodo de 250W, como la serie 4CX250, la disipación de ánodo será de 200W. Para el voltaje de suministro de ánodo de CC recomendado de 2 kV, la válvula 4CX250 debe consumir 100 mA de corriente inactiva.

Si examinamos la hoja de datos de Eimac para el triodo 3-500Z, vemos su recomendación para el funcionamiento en Clase AB 2 . El 3-500Z es más lineal con un suministro de ánodo de alrededor de 3 kV y cuando está inactivo a este voltaje consume 62 mA. Esta es una disipación de ánodo de 186W. Sin embargo, para proporcionar este estado, el voltaje del cátodo debe elevarse a + 10 V en lugar de la condición normal de polarización cero. Si el suministro del ánodo se reduce a 2,5 kV, se puede prescindir de la polarización adicional de + 10 V. Ahora consume una corriente inactiva de 130 mA cuando se ejecuta en una verdadera condición de polarización cero. En esta condición, la disipación del ánodo inactivo es de 325 W.

Si el suministro del ánodo se eleva al máximo de 3,5 kV, la polarización del cátodo debe elevarse a + 15 V para mantener la corriente del ánodo bajo control. Esto está inactivo a 53 mA, una disipación de 185 W.

Con la unidad completa en el suministro de 3 kV, consume una potencia de entrada de CC de un solo tono de 1200 W y normalmente produce 740 W. Por tanto, la disipación del ánodo es $(1200 - 740) = 460\text{W}$. En el voltaje de ánodo más bajo de 2.5kV, consume una entrada de CC de 1kW y produce 600W, una disipación de 400W.

Si elegimos el suministro máximo de ánodo de 3.5kV, la entrada de CC es 1400W, la salida es 890W y la disipación del ánodo es 510W. Se establece que la disipación máxima del ánodo es de 500 W.

En todos esos modos, necesita aproximadamente 45 W de potencia de accionamiento cuando está en una configuración de red con conexión a tierra.

Amplificadores de red con conexión a tierra Estos se tratan con más detalle más adelante, pero un factor interesante acerca de ellos es la aparente eficiencia posible. Al medir la potencia de salida y la potencia de entrada, se obtiene una cifra de eficiencia mayor de lo que parece realista. Esto finalmente se atribuyó al hecho de que parte de la potencia de accionamiento de entrada se alimenta a través de la válvula desde el cátodo al ánodo y aumenta la potencia del ánodo. Si se utiliza una cantidad excesiva de unidad, es posible un aumento de la potencia de salida de hasta un 11%.

Como resultado de esto, la FCC en Estados Unidos cambió la redacción de la licencia de aficionado para atender este efecto. Afirmaron que si el porcentaje de potencia de alimentación estaba por encima de un cierto valor, la entrada de CC al ánodo debía reducirse para mantenerse dentro del nivel de entrada de CC de 1 kW permitido.

En un amplificador de rejilla con conexión a tierra, el cátodo y la señal del ánodo están en fase y se suman. En el amplificador de cátodo conectado a tierra, están desfasados 180° y, por lo tanto, la potencia de alimentación se resta de la potencia del ánodo.

Esto fue en los días antes de que la salida de RF pudiera medirse con precisión y los transmisores eran de los tipos AM y CW, es decir, antes de SSB, donde solo se medía la potencia de salida. Hoy en día, la potencia de entrada de CC no se usa excepto, en algunos países, para los modos FM y CW. Si tiene que usar una potencia de entrada de CC de 1200W para alcanzar 400W PEP, eso no es motivo de preocupación, solo afecta al operador que tiene que pagar la factura de la luz. Muchos de los primeros equipos comerciales de aficionados se especificaron como entrada PEP y no como salida. Esto hizo que el equipo se viera mejor, pero cuando se consideró el factor de eficiencia, a menudo dieron menos de la mitad de la potencia de la cifra de entrada citada. El primer Yaesu FTdx500 era un transceptor de HF con una potencia de entrada PEP de 500W: normalmente daba una salida PEP de unos 180W.

1.5 Diseño de amplificadores Clase C empleando valvulas

Los amplificadores de potencia clase C se caracterizan por proveer amplificación con alta eficiencia y son utilizados principalmente en aplicaciones de RF, donde se requiere un incremento en el nivel de potencia y no se requiere linealidad entre la tensión de entrada y tensión de salida.

Los amplificadores Clase C pueden ser modulados en amplitud por inyección de la tensión modulante en la placa, reja ó grilla pantalla, reja ó grilla control ó cátodo. También son utilizados para

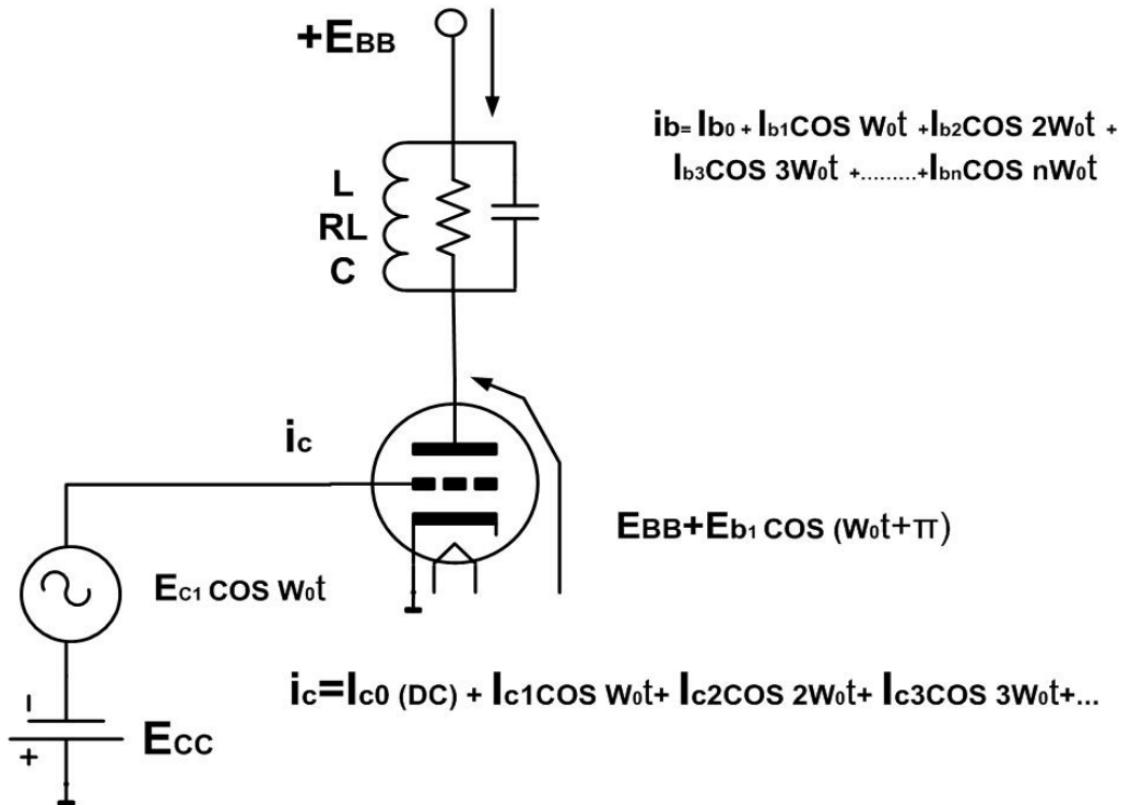
amplificar una portadora modulada en frecuencia.

En el circuito de placa la eficiencia puede ser tan alta como el 85%, pero la mayoría de los amplificadores se diseñan para operar con eficiencia del orden de 75%, debido a que incrementar el rendimiento del 75% al 85% significa un aumento importante de la potencia de reja, además grandes eficiencias son obtenidas con elevadas tensiones de placa.

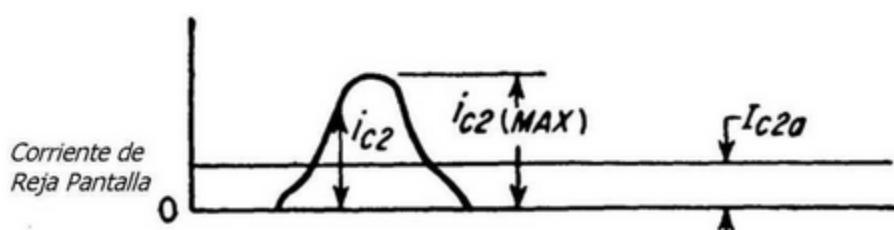
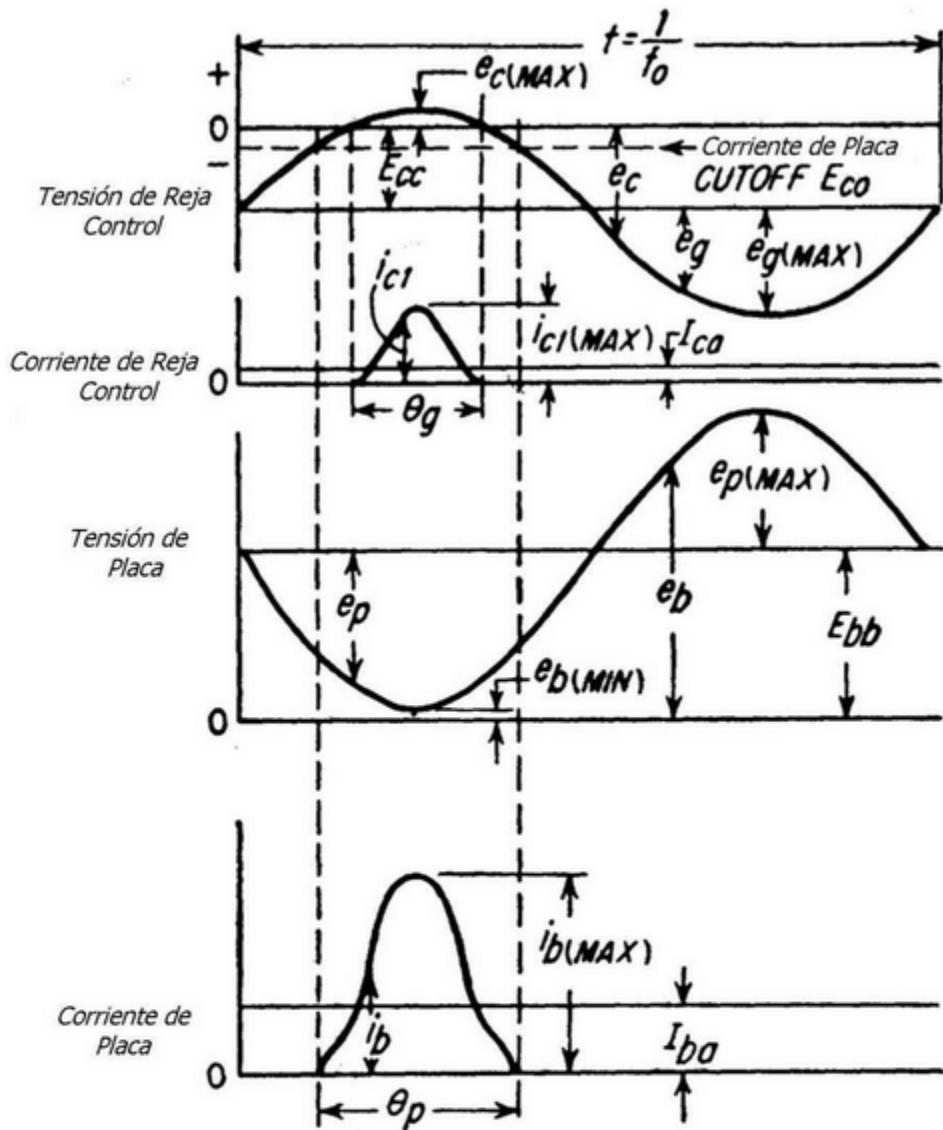
En un amplificador Clase C, la reja se polariza por debajo del corte y la corriente de placa circula durante menos de 180° por cada ciclo de la tensión de excitación de reja, por esto los amplificadores Clase C, no son usados en aplicaciones de audio debido a que la tensión de salida no es proporcional a la tensión de entrada y los pulsos de placa tendrían una excesiva distorsión.

Sin embargo un amplificador Clase C puede ser usado en aplicaciones de RF, si el circuito de placa es resonante a la componente fundamental o algunas de las armónicas de la frecuencia de excitación de reja, de esta forma el pulso de la corriente de placa es filtrado por el circuito resonante de placa para proveer una salida muy cercana a una sinusoides. Cuando el amplificador es usado como multiplicador de frecuencia, el circuito de placa deberá resonar a alguna de las armónicas de la tensión de excitación, la potencia de salida se reduce considerablemente, siendo la eficiencia del orden del 40 a 50% cuando se los utiliza como dobladores y del 15 a 20% como triplicadores.

1.5.1 Relación entre las Tensiones y las Corrientes



La forma de onda de las tensiones y las corrientes de un amplificador Clase C de terminación única utilizando tetrodos o pentodos, se puede ver a continuación:



Formas de Ondas de Tensiones y Corrientes para un Amplificador Clase C

$$\text{Tensiones } e_c = E_{CC} + e_{c1}\cos(\omega_o t)$$

$$e_b = E_{BB} + e_{b1}\cos(\omega_o t + \pi)$$

Corriente $i_e = k(e_c + \frac{e_b}{\mu})^\alpha$

Que se puede aproximar a una serie empleando Fourier

$$i_b = I_{bo} + i_{b1}\cos(w_o t) + i_{b2}\cos(2w_o t) + \dots + i_{bn}\cos(nw_o t)$$

Potencia $P_{dc} = E_{BB}I_{bo}$

$$P_o = \frac{e_{b1}i_{b1}}{2}$$

$$P_{placa} = P_{dc} - P_o$$

Rendimiento $\eta = \frac{P_o}{P_{dc}} = \frac{e_{b1}i_{b1}}{2E_{BB}I_{bo}}$

$$\eta_v = \frac{e_{b1}}{E_{BB}}$$

$$\eta_i = \frac{i_{b1}}{2I_{bo}}$$

$$\eta = \eta_v\eta_i$$

Desarrollo del rendimiento en función al angulo del conducción $i_e = k(E_{CC} + e_{c1}\cos(w_o t) + \frac{E_{BB}-e_{b1}\cos(w_o t)}{\mu})^\alpha$

$$i_e = k(E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu} + (e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu})\cos(w_o t))^\alpha$$

$$i_e = k(E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu} + (e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu})\cos(w_o t))^\alpha$$

$$\cos(\frac{\theta_c}{2}) = -\frac{E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu}}{(e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu})}$$

$$i_{e(max)} = k(E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu} + (e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu}))^\alpha$$

$$k = \frac{i_{e(max)}}{(E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu} + (e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu}))^\alpha}$$

$$i_e = \frac{i_{e(max)}}{(E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu} + (e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu}))^\alpha} (E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu} + (e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu})\cos(\theta))^\alpha$$

Para las maximas escusiones de señal

$$E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu}$$

$$e_{c1} - \frac{e_{b1}}{\mu}$$

$$i_e = i_{e(max)} \left(\frac{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + \cos(\theta)}{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + 1} \right)^\alpha$$

$$i_{bo} = \frac{i_{e(max)}}{2\pi} \int_{-\frac{\theta_c}{2}}^{\frac{\theta_c}{2}} \left(\frac{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + \cos(\theta)}{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + 1} \right)^\alpha d\theta$$

$$i_{b1} = \frac{i_{e(max)}}{\pi} \int_{-\frac{\theta_c}{2}}^{\frac{\theta_c}{2}} \left(\frac{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + \cos(\theta)}{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + 1} \right)^\alpha \cos(\theta) d\theta$$

$$i_{b2} = \frac{i_{e(max)}}{\pi} \int_{-\frac{\theta_c}{2}}^{\frac{\theta_c}{2}} \left(\frac{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + \cos(\theta)}{-\cos(\frac{\theta_c}{2}) + 1} \right)^\alpha \cos(2\theta) d\theta$$

Para el caso de $\alpha = 1$

$$i_{bo} = \frac{i_{e(max)}}{2\pi(1-\cos(\frac{\theta_c}{2}))} (2\sin(\frac{\theta_c}{2}) - \theta_c \cos(\frac{\theta_c}{2}))$$

$$i_{b1} = \frac{i_{e(max)}}{\pi(1-\cos(\frac{\theta_c}{2}))} (\frac{\theta_c}{2} - \sin(\frac{\theta_c}{2}) \cos(\frac{\theta_c}{2}))$$

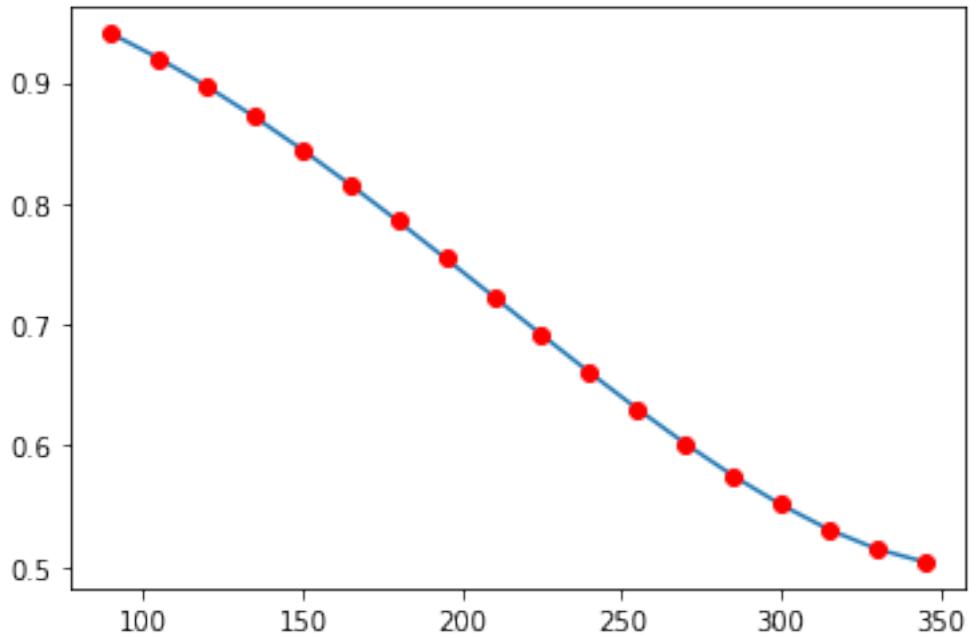
$$\eta_i = \frac{i_{b1}}{2I_{bo}}$$

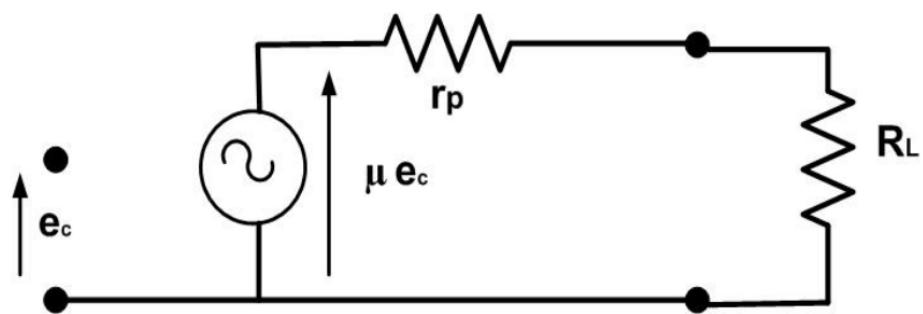
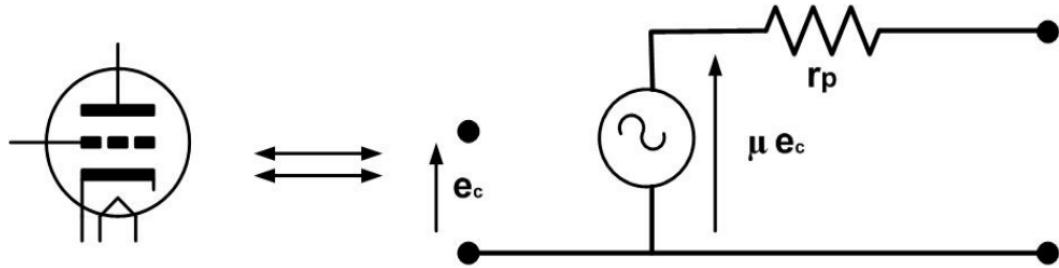
$$\eta_i = \frac{\frac{\theta_c}{2} - \sin(\frac{\theta_c}{2}) \cos(\frac{\theta_c}{2})}{2\sin(\frac{\theta_c}{2}) - \theta_c \cos(\frac{\theta_c}{2})}$$

```
[8]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
thc = np.arange(np.pi/2, 2*np.pi, np.pi/12)

ni = (thc/2 - np.sin(thc/2) * np.cos(thc/2))/(2* np.sin(thc/2) - thc * np.
      -cos(thc/2))

plt.plot(thc/np.pi*180, ni)
plt.plot(thc/np.pi*180, ni, 'ro')
plt.show()
```



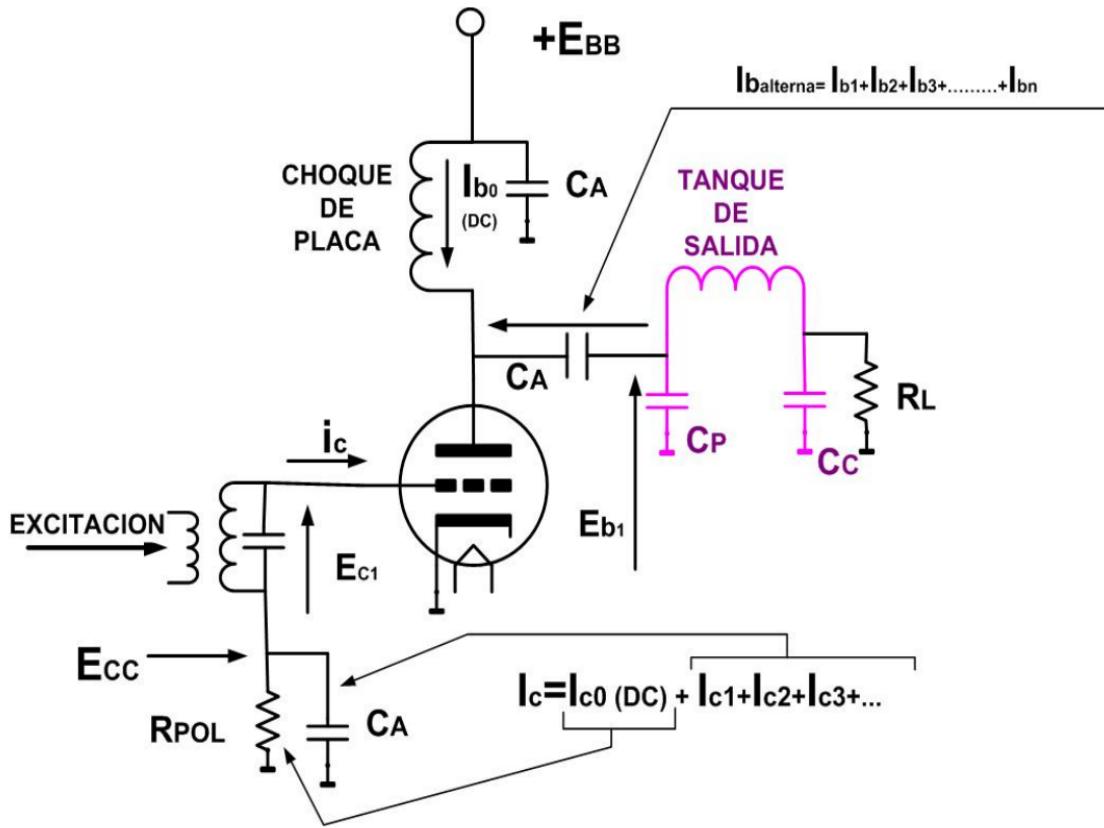


$$i_b = g_m \left(E_{CC} + \frac{E_{BB}}{\mu} + \left(E_{c1} - \frac{E_{b1}}{\mu} \right) \cos(\theta) \right)$$

$$i_b = g_m \left(E_{c1} - \frac{E_{b1}}{\mu} \right) \left(\cos(\theta) - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)$$

1.5.2 DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR CLASE C CON VALVULA DE VACIO

El análisis de un amplificador clase C, se lleva a cabo en un circuito básico con una sola válvula. Si se usa operación en paralelo o push pull, la potencia de salida, entrada a grilla y requerimientos de la fuente de potencia se multiplican por el número de tubos utilizados.



1. Determinación de la potencia de salida (P_o): Además de la potencia real sobre la carga que necesitamos, se deben incluir las pérdidas de potencia en el circuito tanque de placa y en el circuito de acoplamiento. Si la frecuencia de operación está por encima de los $50MHz$, se debe considerar la pérdida en los dieléctricos de los materiales aislantes de la envolvente de la válvula.

2. Cálculo de la disipación de placa por tubo aproximada (P_{bs}): $P_{bs} = kP_o$

k	θ_p (Recomendado)	Armónicas
0,33	de 120 a 150	Fundamental
1,0	de 90 a 120	2 armónico
2,33	de 80 a 110	3 armónico
3,44	de 70 a 90	4 armónica
4,35	de 60 a 75	5 armónica

Existen diversos ángulos de circulación de la corriente de placa recomendados, de acuerdo con el uso.

3. Selección de la válvula que satisfaga las condiciones requeridas:

1. Disipación de placa debe ser mayor al encontrado en el punto anterior.
2. Frecuencia de operación.
3. Tensión de placa, grilla pantalla y filamento requerida.

4. Sistema de enfriamiento (aire, agua, aire forzado).
5. Características físicas: dimensión y forma, resistencia mecánica a golpes y vibraciones, etc.
6. Potencia de excitación de grilla.
7. Tipo de servicio (CW, AM, etc.)

4. Determinación de la tensión de polarización E_{bb} : En la mayoría de los manuales, la información que se da es la máxima tensión de placa admisible.

En este caso debemos tomar un margen de seguridad o tomar los valores recomendados de acuerdo al tipo de servicio que se va a utilizar.

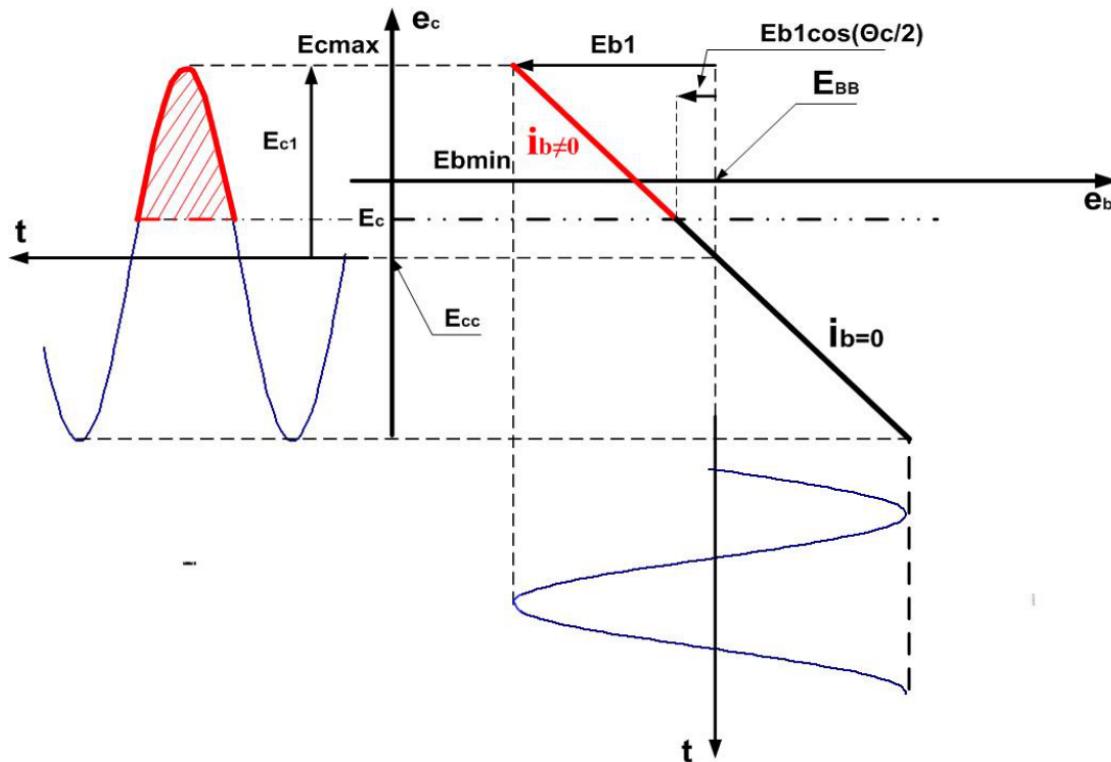
5. Cálculo de la corriente promedio de placa I'_{ba} : $I'_{ba} = (P_o + P_{bs})/E_{bb}$

Este valor no debe exceder la máxima corriente admisible de la válvula.

6. Cálculo del valor pico de la corriente de placa por tubo: Se estima un valor:

$$i_{b(max)} = 4I'_{ba}$$

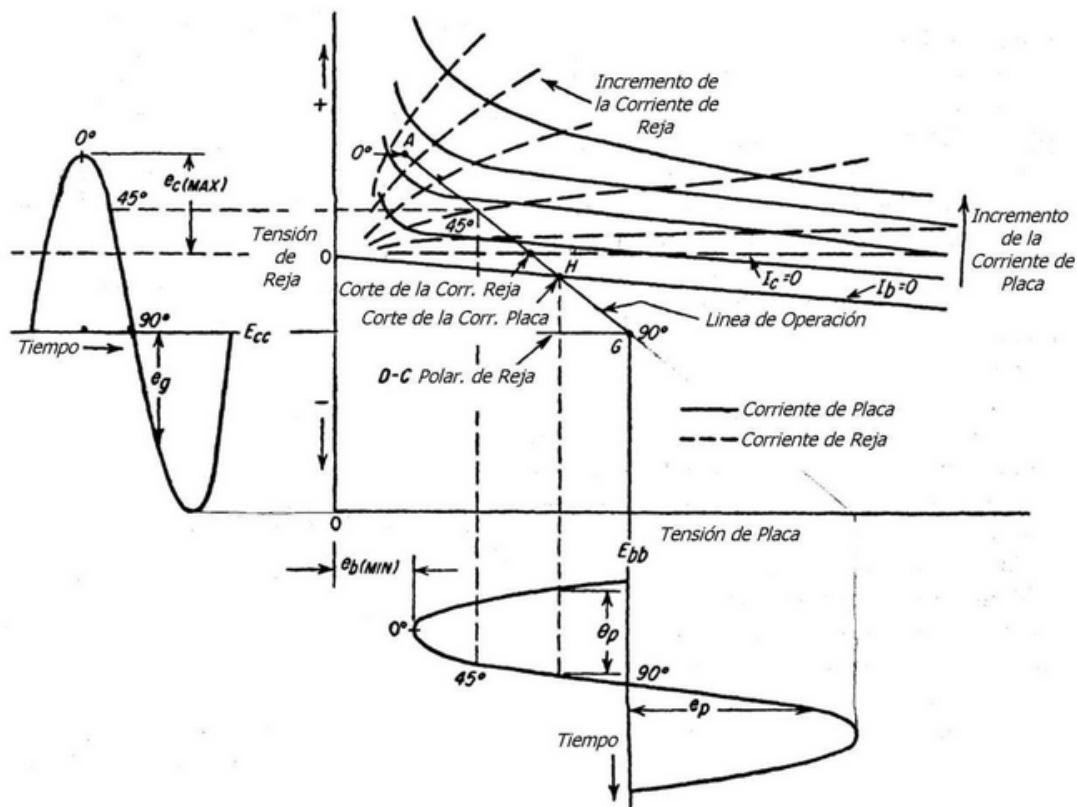
Esta es la relación aproximada entre el valor pico y el valor medio de la corriente de placa. Es necesario hacer una estimación de $i_{b(max)}$ para realizar el análisis gráfico.



7. Localización del punto A sobre las características de corriente constante: El punto A determina: $e_{c(max)}$, $e_{b(min)}$, $i_{b(max)}$, $i_{c(max)}$, $i_{c2(max)}$, este punto A se ubica sobre la curva de corriente constante cuyo valor se obtuvo en el pto. 6.

En caso de utilizar un triodo con una gran excitación de grilla, el punto puede localizarse muy cerca de la recta diodo, la que se encuentra definida por la relación $E_c = E_b$, pero si la potencia de excitación de grilla es limitada, el potencial mínimo instantáneo de placa ($e_{b(min)}$) debe ser algo mayor que la tensión pico positiva de reja ($e_{c(max)}$), por esto se hace necesario desplazar el punto A de la recta diodo.

En tetrodos el punto A debe localizarse cerca del punto donde las curvas de corriente de placa giran abruptamente hacia arriba. Se debe tener en cuenta que si $e_{b(min)}$ es grande, disminuye la potencia de excitación requerida, pero se reduce la máxima tensión de placa provocando esto una disminución de la potencia de salida, lo que hace aumentar la potencia de disipación, obteniéndose un menor rendimiento.



Características de Corriente Constante para un triodo, mostrando una Línea de Operación y sus Formas de Ondas de Tensiones Asociadas

Si el punto A se ubica de forma que $e_{b(min)}$ sea pequeño, la corriente de reja pantalla y control podrían ser excesivas y el incremento en la potencia de salida sería relativamente pequeño.

Nota: puede ampliarse en rango de tensión y Corriente del gráfico multiplicando la tensión por un factor de escala y la corriente por el mismo factor de escala elevado a la potencia $3/2$ (ley de Child), cuando se toma otra tensión de reja pantalla distinta a la de la gráfica. Es preferible a veces sacrificar linealidad para que e_{bmin} no sea grande.

8. Determinación de E_{cc} y localización del punto G: El punto G está determinado por E_{cc} y E_{bb} .

Sin embargo el valor de la polarización de grilla está determinado por el ángulo de conducción de placa deseado. Luego es necesario adoptar un valor de θ_p y determinar gráficamente el valor de E_{CC} , que produce ese θ_p deseado.

La ecuación siguiente permite determinar en forma aproximada el valor de e_{cc} , esta permite minimizar el número de pasos prueba-error en la determinación gráfica de Ecc.

$$E_{cc} = \frac{|E_{co}| + e_{c(max)} \cos(\frac{\theta_p}{2})}{1 - \cos(\frac{\theta_p}{2})}$$

Donde E_{co} es la tensión de polarización de reja de corte (se corta la corriente de circulación de placa), ésta se obtiene a partir de la tensión de polarización de placa E_{bb} , subiendo hasta cortar la curva de corriente de placa igual a cero. El valor de θ_p se elige de acuerdo con la tabla indicada en el punto 2, por ejemplo del orden de 140°. Con estos valores se puede determinar el valor de E_{cc} . El punto G se localiza en las coordenadas (E_{cc}, E_{bb}) . La unión de A y G es la trayectoria de operación. Con los puntos A y G se puede calcular el valor de θ_p con:

$$\theta_p = 2\arccos(HG/AG)$$

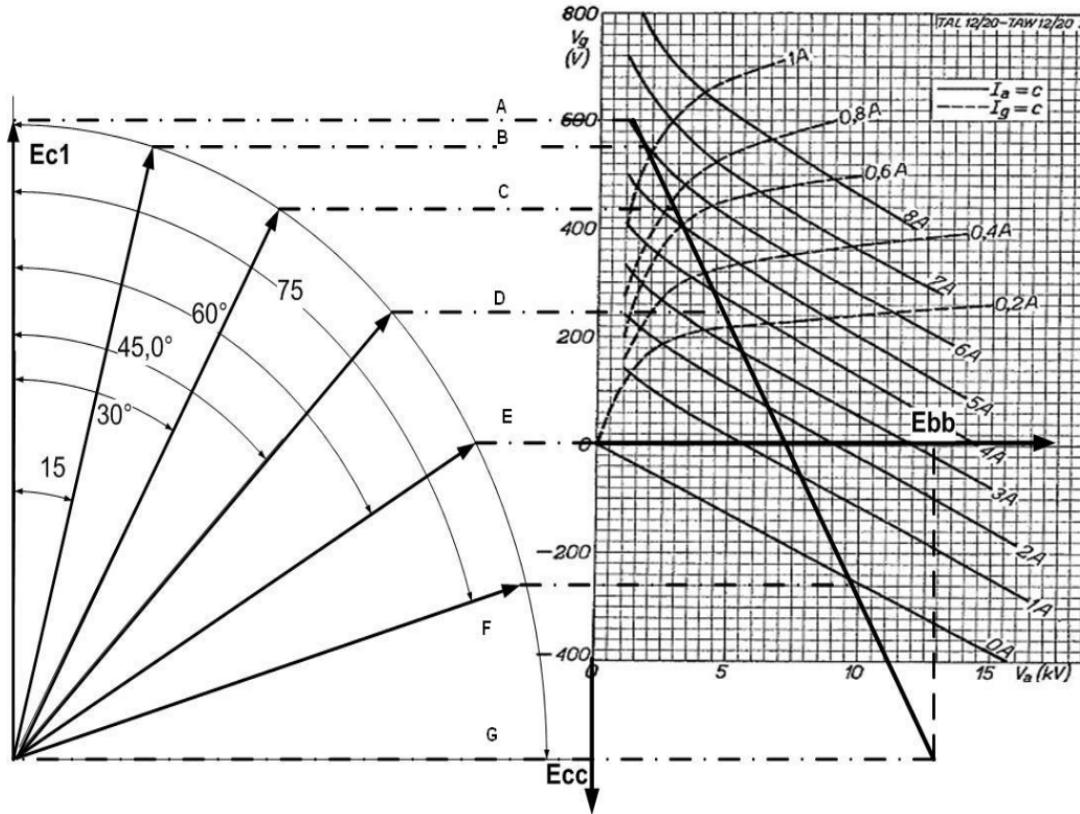
La determinación de HG y AG se realiza midiendo las distancias sobre la línea de operación. Calculado θ_p se compara con el valor elegido, si el calculado es menor que el elegido, se deberá hacer la polarización menos negativa, esto incrementa el ángulo de circulación de placa, haciendo que el punto G se desplace hacia arriba.

Con este nuevo par de valores HG y AG se calcula nuevamente el ángulo θ_p y se vuelve a comparar, esto se repite hasta que coincidan los valores.

9. Determinación del valor pico de la tensión de excitación: Esta es igual al valor absoluto de la tensión de polarización de reja más el pico positivo de la tensión reja cátodo, esto es:

$$e_{g(max)} = |E_{cc}| + e_{c(max)}$$

$$e_{p(max)} = E_{bb} - e_{b(min)}$$



10. Determinación de las componentes de continua, fundamental y armónicos de la corriente de placa (análisis armónico de Chaffee): Las ecuaciones indicadas a continuación nos permiten obtener el valor de la CC de entrada, el valor pico de la componente fundamental de la corriente de placa y los valores pico aproximado de la componente de 2 y 3 armónico:

$$I_{dc} = \frac{1}{12}(\frac{A}{2} + B + C + D + E + F)$$

$$I_{H1} = \frac{1}{6}(\frac{A}{2} + B\cos(\frac{\pi}{12}) + C\cos(\frac{\pi}{6}) + D\cos(\frac{\pi}{4}) + E\cos(\frac{\pi}{3}) + F\cos(\frac{5\pi}{12}))$$

$$I_{H2} = \frac{1}{6}(\frac{A}{2} + B\cos(\frac{\pi}{6}) + C\cos(\frac{\pi}{3}) + D\cos(\frac{\pi}{2}) + E\cos(\frac{2\pi}{3}) + F\cos(\frac{5\pi}{6}))$$

Donde los puntos A, B, C, D, etc. son los valores de corriente leídos de la recta de operación a intervalos de 15° de la tensión de excitación de reja, gráficamente establecen los valores asociados de la tensión de reja control, reja pantalla y corriente de placa a lo largo de la línea de operación.

Un método para obtener estos valores consiste en localizar los puntos indicados sobre la recta de operación según las siguientes expresiones:

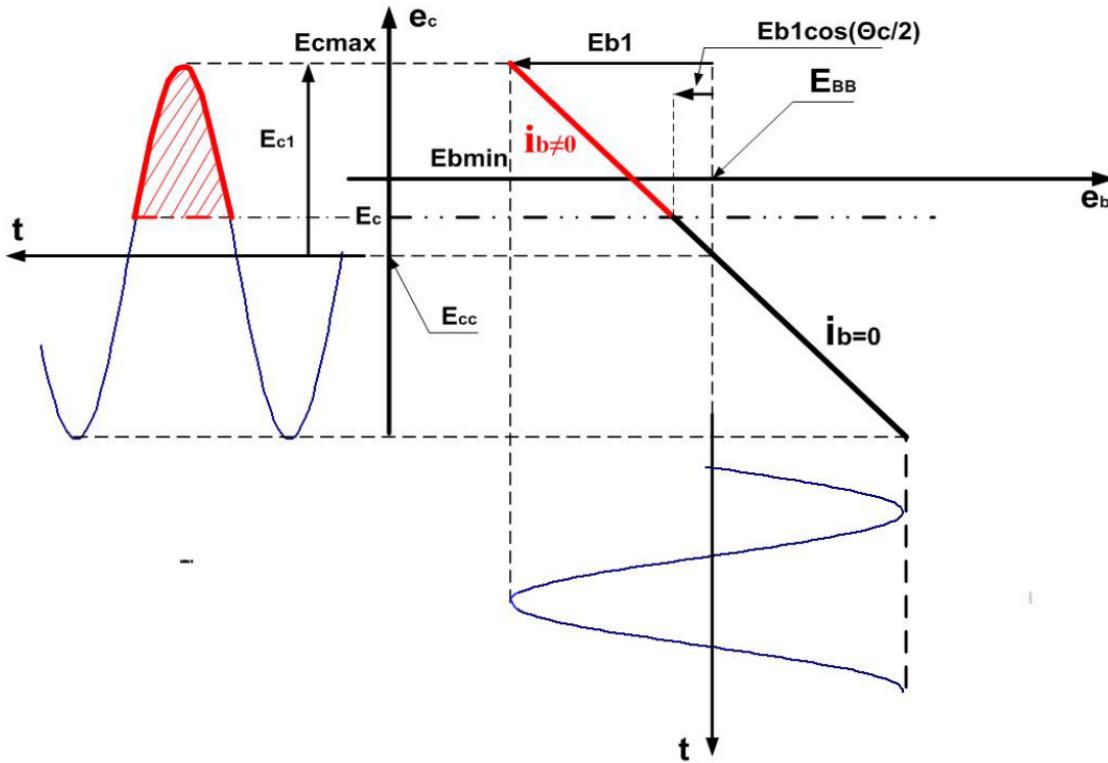
$$BG = AG\cos 15 = 0.966AG$$

$$CG = AG\cos 30 = 0.866AG$$

$$DG = AG\cos 45 = 0.707AG$$

$$EG = AG\cos 60 = 0.500AG$$

$$FG = AG\cos 75 = 0.290AG$$



El punto F se ubicará por encima o por debajo del punto H según que el ángulo de conducción $\theta_p \leq 150$

El valor de I_{dc} encontrado es el verdadero valor de la componente continua de placa.

Los puntos A B C D E F son los valores de la corriente correspondiente a esos puntos sobre la línea de operación.

La primera ecuación también se puede utilizar para calcular la corriente promedio de la reja control (I_{ca}) y de la reja pantalla (I_{c2a}).

Si el valor de I_{dc} es demasiado alto respecto de la máxima corriente admisible de la válvula, se deberá disminuir θ_p o el valor pico de la corriente instantánea (o sea punto A).

Si el % de armónicos es alto, se puede aumentar el valor de θ_p .

11. Cálculo de la potencia que debe suministrar la fuente de alimentación de placa:

$$P_{dc} = nE_{bb}I_{ba}$$

Donde el I_{ba} se obtiene de la primera ecuación de Chaffee y n = número de válvulas.

12. Determinación del rendimiento de placa, disipación de placa y disipación de reja pantalla de la válvula:

Rendimiento de placa:

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

Potencia de disipación de placa:

$$P_{bs} = E_{bb}I_{ba} - \frac{(e_{pmax}I_{H1})}{2}$$

Potencia de disipación de reja pantalla:

$$P_{c2} = E_{cc2} I_{c2a}$$

13. – Cálculo de la potencia total de excitación: Potencia de excitación:

$$P_t = n1.1(P_{c1} + P_1)$$

$$P_{c1} = e_{cmax} I_{ca}$$

$$P_1 = I_{ca} 2R_1 = E_{cc} I_{ca}$$

Se toma un 10% adicional para tener en cuenta la de pérdida en los circuitos de polarización (1,1).

14. Polarización por escape de reja, cálculo de R1: Si toda la polarización de reja se realiza mediante escape de reja, el valor de R1 se puede obtener con:

$$R_1 = |E_{cc}| / nI_{ca}$$

Si se utiliza una combinación de polarización por escape de reja con polarización fija, el valor de R1 se puede obtener con:

$$R_1 = |E_{cc} - E_{cfija}| / nI_{ca}$$

15. Diseño del circuito tanque de salida: $r_b = \frac{(E_{bb} - e_{b(min)})^2}{2P_o} = \frac{(E_{bb} - e_{b(min)})}{I_{H1}}$

$$r_b = L_p / (R_r + R_s)C_p$$

$$Q_o L = \frac{w_o L_p}{R_r + R_s}$$

$$R_b = \frac{Q_o}{2\pi f_o C_p}$$

$$C_p = \frac{Q_o L}{w_o r_b}$$

$$L_p = \frac{1}{w_o^2 C_p}$$

$$Q_o = \frac{w_o L_p}{R_s}$$

Estimamos Q_o para un buen rendimiento de aproximadamente 10.

$$R_s = \frac{w_o L_p}{Q_o}$$

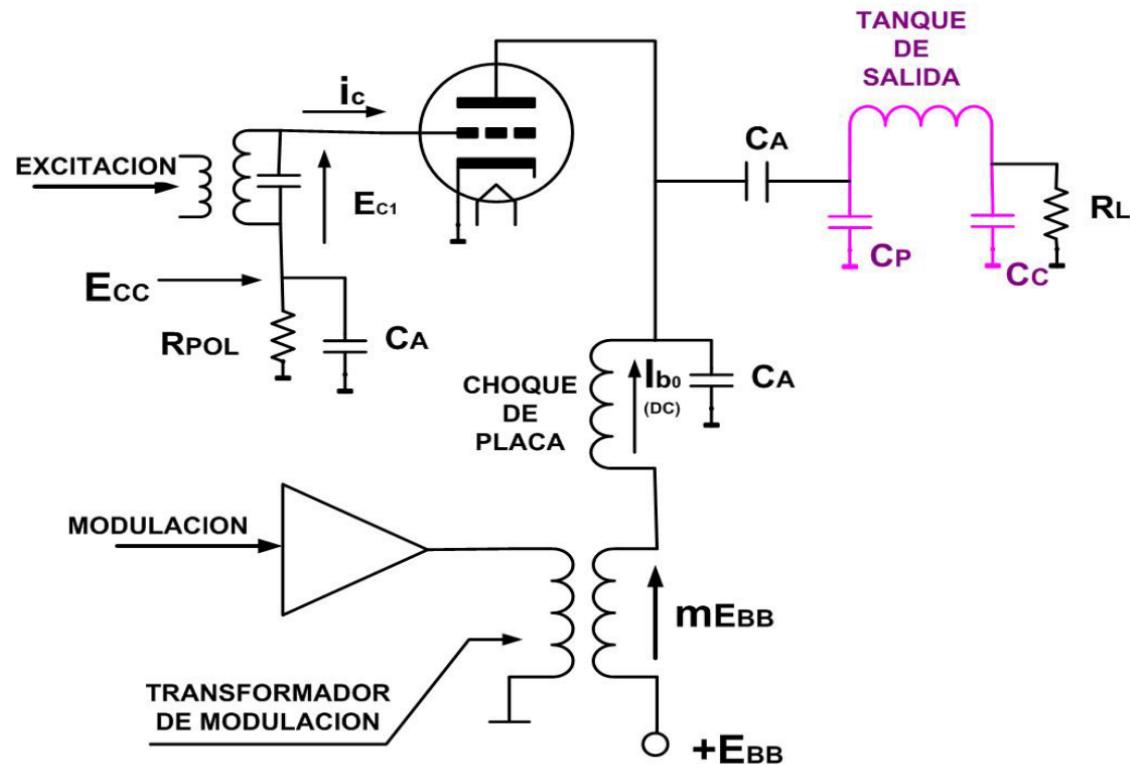
$$R_r = \frac{(w_o L_p)}{Q_o L} - R_s$$

1.6 Amplificador Clase C modulado en Placa

Las forma más utilizada para obtener modulación de amplitud de una portadora de RF, es modulando en la salida a la etapa de potencia de RF (Amplificador clase C). Esta modulación posee las ventajas de facilidad de ajuste y alto porcentaje de modulación con buena linealidad.

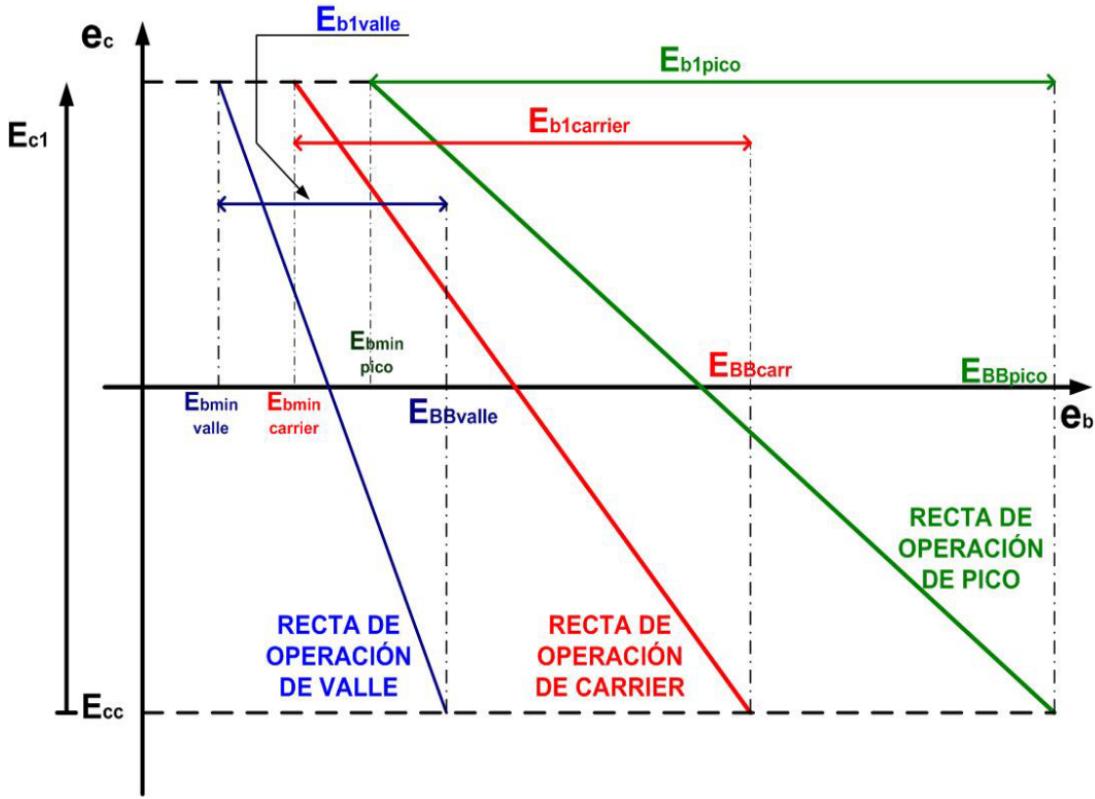
Posee la desventaja de requerir un modulador capaz de entregar una potencia aproximadamente igual a la mitad de la potencia de entrada del amplificador sin modular. Durante el pico positivo de la señal moduladora (al 100%), la potencia total de entrada (portadora más modulante) y la potencia de salida de rf, resultan ser cuatro veces mayor que sus valores con modulación cero.

Un circuito típico usado para modulación de placa de un amplificador clase C con válvula de vacío, se puede ver en la figura siguiente:



La tensión de alimentación aplicada del amplificador clase C varía con la señal modulante, sumándose la tensión modulante con la tensión de alimentación de placa.

En un amplificador clase C, la forma en que la variación de la tensión de alimentación de placa permite obtener modulación lineal de la tensión de salida de rf, se puede analizar a partir de las curvas características de corriente constante. Para el caso de utilizar un triodo, se traza la línea de operación para modulación cero, para la pico y para el valle de la señal modulada al 100%, con una combinación de polarización fija y por escape de reja, esto se puede ver en al figura N° 6-12



La línea de operación AA' de la Fig. 6-12 representa el sitio de todo los valores instantáneos de tensión y corrientes de reja y de placa durante el semicírculo positivo de la tensión de excitación de reja con modulación cero. El resto del ciclo se obtiene extendiendo la línea AA' una distancia igual debajo del punto A', dónde el punto A' se establece por la tensión de alimentación de placa y la polarización sin modulación. La línea de operación AA' satisface sólo un valor de la impedancia de placa, a la frecuencia de la tensión de rf.

En el pico de la modulación se obtiene una nueva línea de operación BB', la que constituye el sitio de todos los valores instantáneos de tensión y corrientes de reja y de placa. En el valle de la modulación La línea de operación obtenida es la línea CC', esta constituye el sitio de todos los valores instantáneos de tensión reja y de placa del ciclo de la modulación. En esta línea la tensión instantánea de placa es cero y la corriente instantánea de placa es muy pequeña.

Los amplificadores de potencia clase C se caracterizan por proveer amplificación con alta eficiencia y son utilizados principalmente en aplicaciones de RF, donde se requiere un incremento en el nivel de potencia y no se requiere linealidad entre la tensión de entrada y tensión de salida.

Los amplificadores Clase C pueden ser modulados en amplitud por inyección de la tensión modulante en la placa, reja ó grilla pantalla, reja ó grilla control ó cátodo. También son utilizados para amplificar una portadora modulada en frecuencia.

En el circuito de placa la eficiencia puede ser tan alta como el 85%, pero la mayoría de los amplificadores se diseñan para operar con eficiencia del orden de 75%, debido a que incrementar el rendimiento del 75% al 85% significa un aumento importante de la potencia de reja, además grandes eficiencias son obtenidas con elevadas tensiones de placa.

En un amplificador Clase C, la reja se polariza por debajo del corte y la corriente de placa circula

durante menos de 180° por cada ciclo de la tensión de excitación de reja, por esto los amplificadores Clase C, no son usados en aplicaciones de audio debido a que la tensión de salida no es proporcional a la tensión de entrada y los pulsos de placa tendrían una excesiva distorsión.

Sin embargo un amplificador Clase C puede ser usado en aplicaciones de RF, si el circuito de placa es resonante a la componente fundamental o algunas de las armónicas de la frecuencia de excitación de reja, de esta forma el pulso de la corriente de placa es filtrado por el circuito resonante de placa para proveer una salida muy cercana a una sinusoides. Cuando el amplificador es usado como multiplicador de frecuencia, el circuito de placa deberá resonar a alguna de las armónicas de la tensión de excitación, la potencia de salida se reduce considerablemente, siendo la eficiencia del orden del 40 a 50% cuando se los utiliza como dobladores y del 15 a 20% como triplicadores.

2 Diseño de un Amplificador de RF empleando valvulas

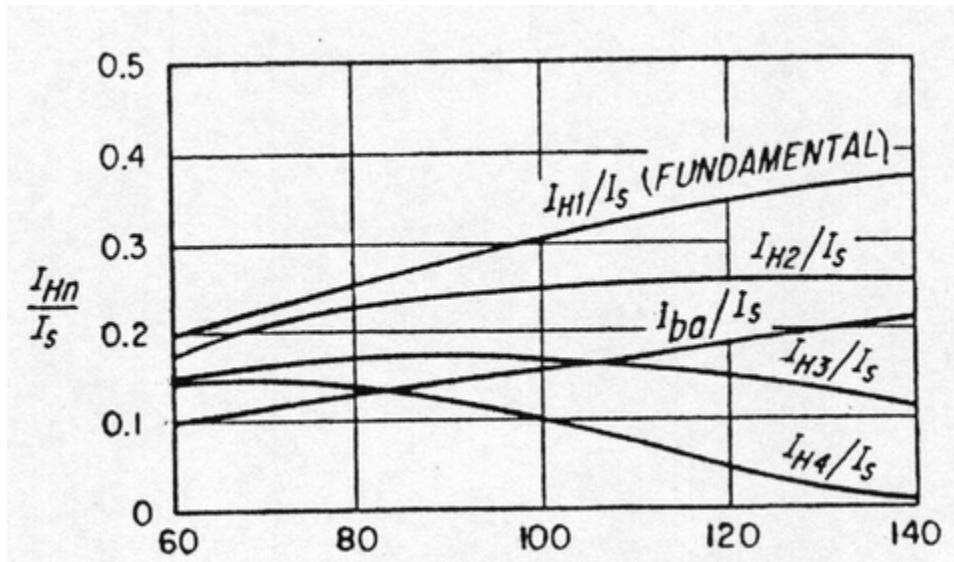
Para obtener altos valores de eficiencia, la tensión de control de polarización de reja (E_{cc}), generalmente se hace de 1.5 a 3 veces mayor que el valor requerido para la corriente de corte de placa. Más allá de la polarización de la válvula, la corriente de corte de placa asegura que la corriente circulará menos de 180° de cada ciclo. Si el circuito resonante de placa tiene un Q lo suficiente alto, la forma de onda de la tensión de salida de placa estará muy próxima a una senoidal, para una circulación de la corriente de placa menor de 180° . De esta forma, el circuito resonante de placa se sintoniza a la frecuencia de operación, estando la tensión de placa 180° desfasada con la tensión de excitación de reja.

La circulación de la corriente de reja es unos grados menores que la circulación de la corriente de placa, donde la corriente de reja circula durante una porción limitada del ciclo de trabajo, en el cual el control de reja está dentro de la región positiva.

La impedancia del circuito de reja-pantalla a la componente alterna del circuito de corriente de la misma está muy cerca ó es igual a cero y para la mayoría de los cálculos puede asumirse que la tensión de señal de la reja pantalla será cero. De modo que la corriente de reja control, reja pantalla y placa circulará por menos de medio ciclo de cada ciclo de excitación.

La relación entre valores picos a valores promedio suele ser relativamente grande, siendo mayor a medida que el ángulo de conducción se hace menor.

Una relación típica de los valores picos de los armónicos de la corriente de placa a corriente espacial pico I_s como una función del ángulo de conducción de la corriente de placa puede verse en la siguiente gráfica:

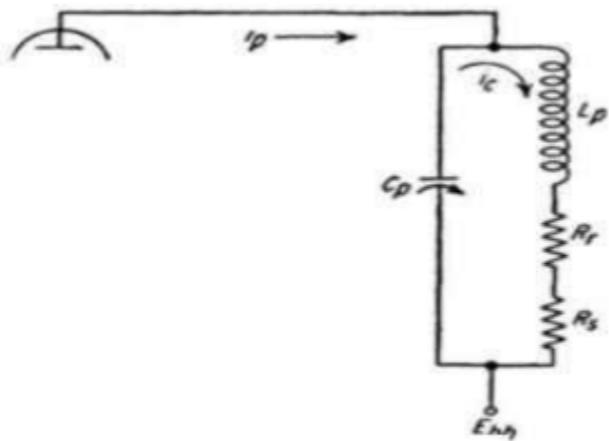
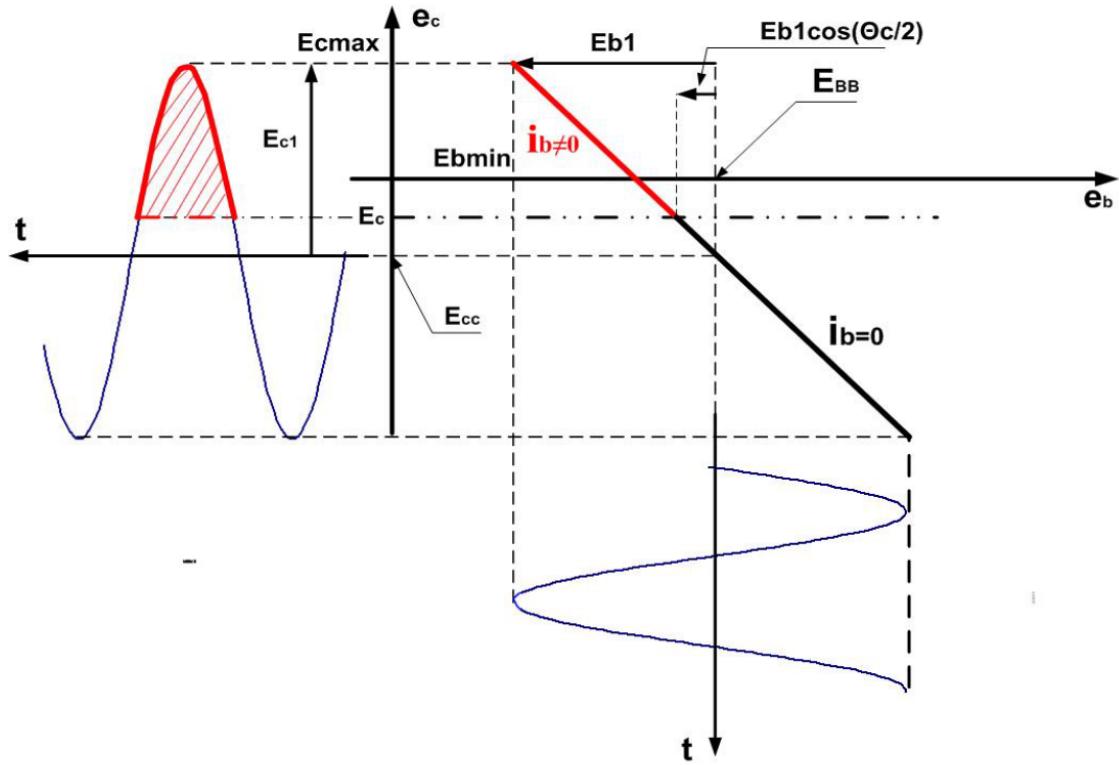


La corriente espacial I_s es la suma de los valores picos instantáneos de las corrientes de la reja control, reja pantalla y placa. Estas curvas se basan en la misma tensión de excitación pico positiva reja-cátodo, los mismos valores de corriente pico de reja y placa e iguales tensiones de alimentación.

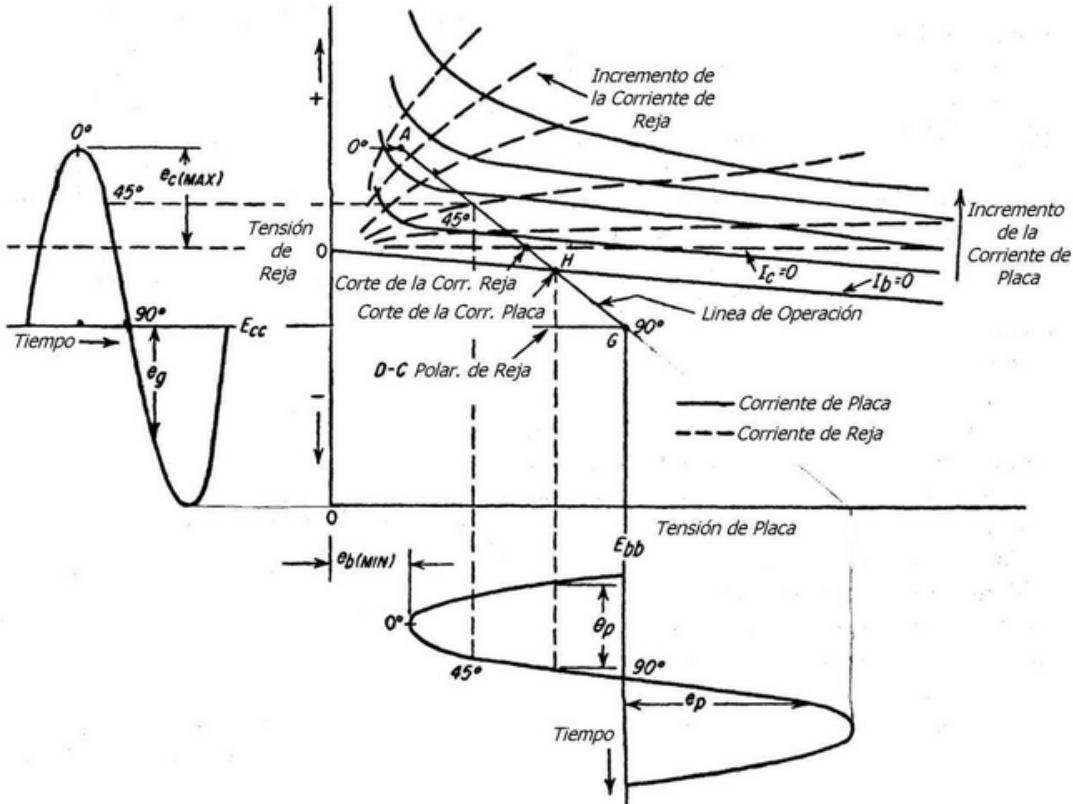
Las variables son las impedancias del circuito de placa, polarización de reja y la amplitud de la tensión de excitación de reja. Puede observarse que para una corriente pequeña de placa el ángulo de conducción o ambos I_{ba}/I_s y I_{H1}/I_s se incrementa linealmente como la corriente de placa con el incremento del ángulo de conducción, mientras que el ángulo de conducción de la corriente de placa aumenta hasta 120 hay un notable incremento en la relación a la cual la pendiente de I_{H1}/I_s decrece. Por esta razón la eficiencia del circuito de placa se reduce si el ángulo de conducción se hace mayor a 120.

2.0.1 Característica de Corriente Constante:

Las características de corriente constante son una gráfica modificada de la familia de característica $E_b - I_b$. La tensión de reja control está graficada sobre la ordenada y la tensión de placa sobre la abscisa. Una familia de curvas está graficada para la reja control, reja pantalla y corriente de placa. Las curvas individuales de cada familia representan un valor constante de corriente. En la figura se ven las características típicas de las curvas de corriente constante de un tríodo con las formas de ondas de tensión típicas de reja y placa incluidas.



Circuito de Placa equivalente
de un Amplificador Clase C



Usualmente la potencia desarrollada en el circuito de placa puede ser expresada en términos de la componente fundamental de la tensión y corriente de placa.

1. La potencia de salida de placa (P_o) puede expresarse como: $P_o = e_{p(max)} I_{H1}$

Donde:

$e_{p(max)}$, valor pico de la tensión de placa de RF ($E_{bb} - e_{b(min)}$).

I_{H1} , valor pico de la corriente fundamental de placa.

El valor pico de la corriente fundamental de placa I_{H1} se obtiene del análisis de la forma de onda de la corriente de placa.

2. La potencia de entrada de placa (P_{dc}) debe ser suministrada por la fuente de alimentación de corriente continua y esta es: $P_{dc} = E_{bb} I_{ba}$

Donde: I_{ba} , corriente de continua placa (dc)

3. La eficiencia de placa η es la relación de la potencia de salida de placa a la potencia de entrada, expresada como un porcentaje:

$$\eta = \frac{E_{p(max)} I_{H1}}{2 E_{bb} I_{ba}}$$

Sin considerar los armónicos de orden superior, la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida es la potencia disipada en la placa (P_{bs}) y pueden ser determinada por:

$$P_{bs} = E_{bb} I_{ba} - e_{p(max)} I_{H1}$$

2.0.2 Resistencia de carga de placa:

Si bien la recta de operación de la característica de corriente constante de placa no representa explícitamente la resistencia de placa cargada r_b .

Sin embargo, para una línea cualquiera de operación, hay solamente un valor de resistencia de carga que satisface las condiciones impuestas por la línea de operación y estos valores pueden ser calculados con:

$$r_b = \frac{e_{p(max)}}{I_{H1}}$$

$$r_b \sim \frac{(E_{bb} - E_{cc2})^2}{2P_o} \text{ (Tetrodo o Pentodo)}$$

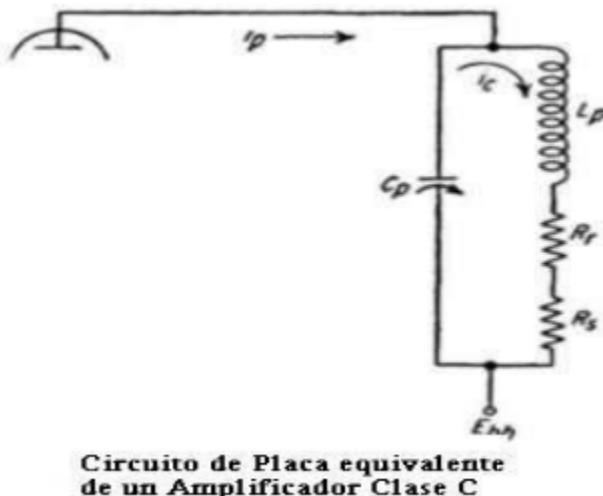
Donde E_{cc2} es la tensión de reja pantalla (ligeramente superior a $e_{b(min)}$)

El proceso de asumir a la placa cargada con una resistencia y establecer la línea de operación con un procedimiento de prueba y error es relativamente difícil, por estar involucrado un método gráfico.

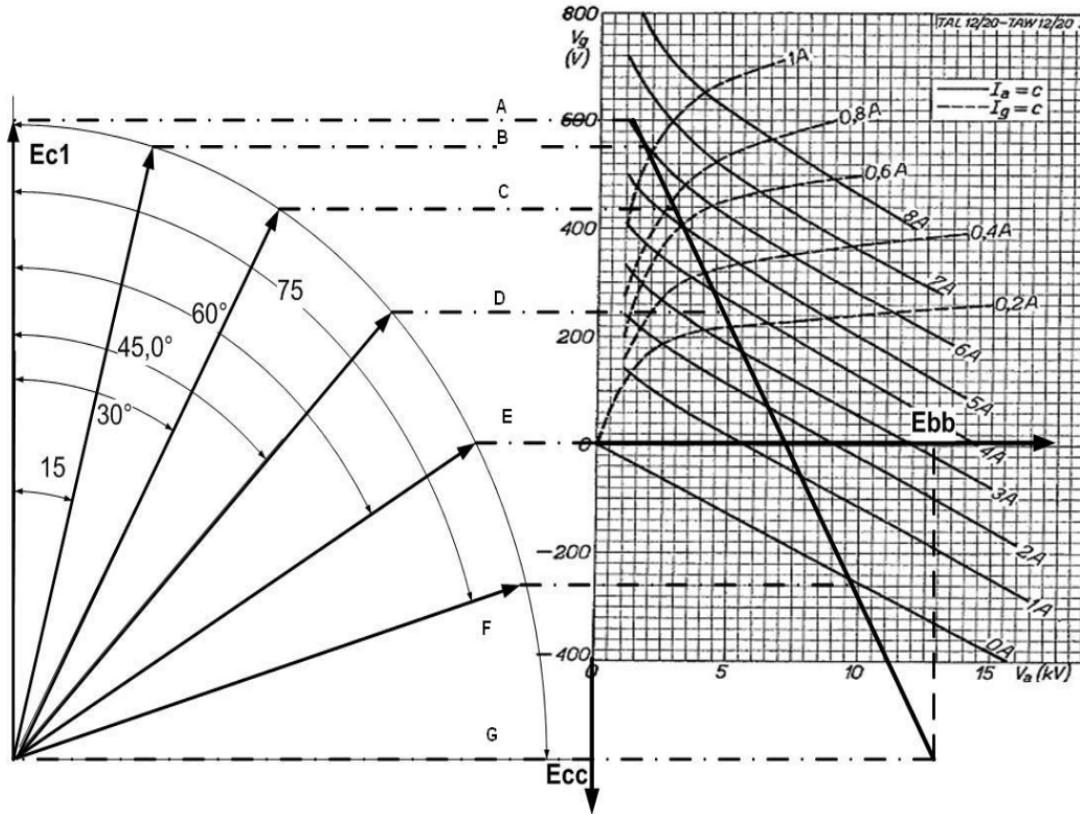
Como se muestra en el procedimiento de diseño recomendado de un amplificador clase C, se determina gráficamente I_{H1} y luego se calcula el valor requerido de r_b .

En el simple circuito tanque de placa, la resistencia externa de placa, por ejemplo: una antena o una etapa adicional, el cual está acoplado a un circuito resonante de placa, puede considerarse como una resistencia R_s en serie con el circuito inductivo de placa.

En la figura siguiente:



Donde R_s es la resistencia serie del inductor.



Ordinariamente el Q del circuito tanque no cargado es lo suficientemente alto por lo que R_s puede ser despreciado.

La resistencia r_b medida en los terminales del circuito de placa en resonancia puede ser calculada con: $r_b = \frac{L_p}{(R_r + R_s)C_p}$

Pudiendo obtenerse un Q_o (del orden de 12).

El valor de r_b determinado por su ecuación debe ser igual al valor deseado de r_b establecido en la (a).

El Q_o del circuito cargado de placa está dado por: $Q_o = \frac{2\pi f_o L_p}{R_r + R_s}$

Donde f_o es la frecuencia de resonancia.

Combinando ambas ecuaciones resulta en una expresión más utilizada para r_b , la cual es: $r_b = \frac{Q_o}{2\pi f_o C_p}$

En la ecuación anterior, puede observarse que hay un número infinito de combinaciones de Q_o y C_p que permiten obtener un valor igual de r_b .

Sin embargo, Q_o no debe ser muy elevado a fin de no provocar que la circulación de corriente en el circuito tanque sea excesiva, lo que puede causar pérdidas no deseadas, pudiendo además resultar dañado el capacitor o el inductor.

El valor eficaz (RMS) de la corriente que circula a través del capacitor o el inductor puede determinarse por: $i_c = \frac{I_{H1}}{\sqrt{2}}$

Donde i_c es el valor rms de la corriente de circulación. I_{H1} , valor pico de la corriente fundamental de placa.

Para prevenir excesivas pérdidas de potencia, algunas veces es necesario bajar el valor de Q_o a valores de 3 ó 4.

Esto causa un incremento del contenido de armónicos en el circuito de placa. En este tipo de operación el contenido de armónico en la salida puede ser minimizado mediante el uso de un filtro en la red de acoplamiento.

En operación push pull todos los armónicos impares se cancelan en la salida.

El ancho de banda BW del circuito de placa cargado puede ser expresado en términos de Q_o y f_o por: $BW = \frac{f_o}{Q_o}$

Donde BW , ancho de banda entre las frecuencias de mitad de potencia.

Además, si Q_o es grande, las frecuencias de modulación más altas puede ser suprimidas en un amplificador clase C modulado en amplitud.

Disipación de reja pantalla El valor de la disipación de reja pantalla puede ser determinado por: $P_{c2} = E_{cc2}I_{c2a}$

Donde

E_{cc2} , tensión de reja pantalla.

I_{c2a} , valor de continua de corriente de reja pantalla.

Requerimiento de excitación de reja control En un amplificador clase C, la potencia que debe suministrar el circuito de reja puede ser dividido en 3 categorías:

– disipación de reja (P_{c1}). – disipación en el circuito de polarización (P_1). – pérdidas en el acoplamiento y tanque de reja.

De donde: $P_{c1} = e_{c(max)}I_{ca}$

Donde $e_{c(max)}$, tensión pico positivo de reja-cátodo. I_{ca} , corriente de continua de reja.

La potencia disipada P_1 en la resistencia de polarización en el caso de polarización por escape de reja más la polarización fija está dada por:

$$P_1 = I_{ca}^2 R_1 = E_{cc} I_{ca}$$

Donde: R_1 , valor de resistencia de polarización de reja.

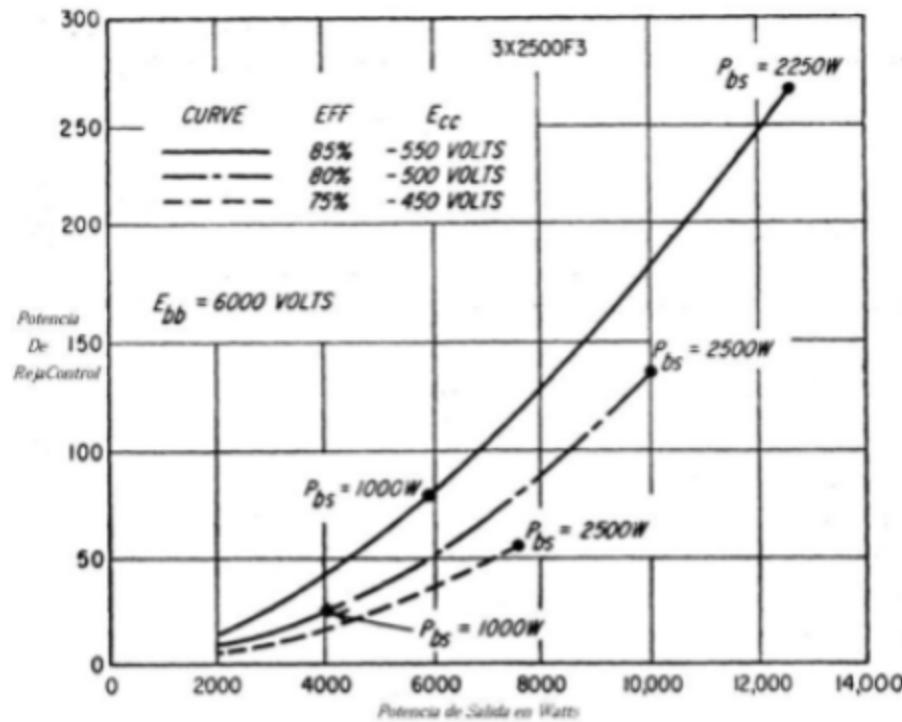
Para frecuencias bajas ó medias, la pérdida de potencia así como la del circuito tanque y circuitos de acoplamiento es usualmente cerca del 10% de la potencia de excitación de reja.

La potencia total P_t requerida puede ser expresada:

$$P_t = 1.1(P_{c1} + P_1)$$

En alta frecuencia, por encima de $50MHz$, la reja y el circuito de reja, tiende a incrementar significativamente sus pérdidas. La potencia de excitación requerida a frecuencia de UHF en algunos casos es 10 ó 20 veces mayores que el valor determinado por la relación e.

Eficiencia de un Amplificador Clase C: La máxima eficiencia de un amplificador clase C teniendo un exceso de potencia de excitación de reja es mayor que en un amplificador en la cual la potencia de reja está limitada. Esto se puede observar en el siguiente gráfico:



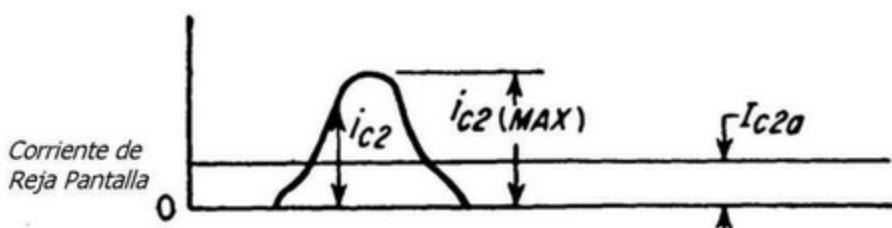
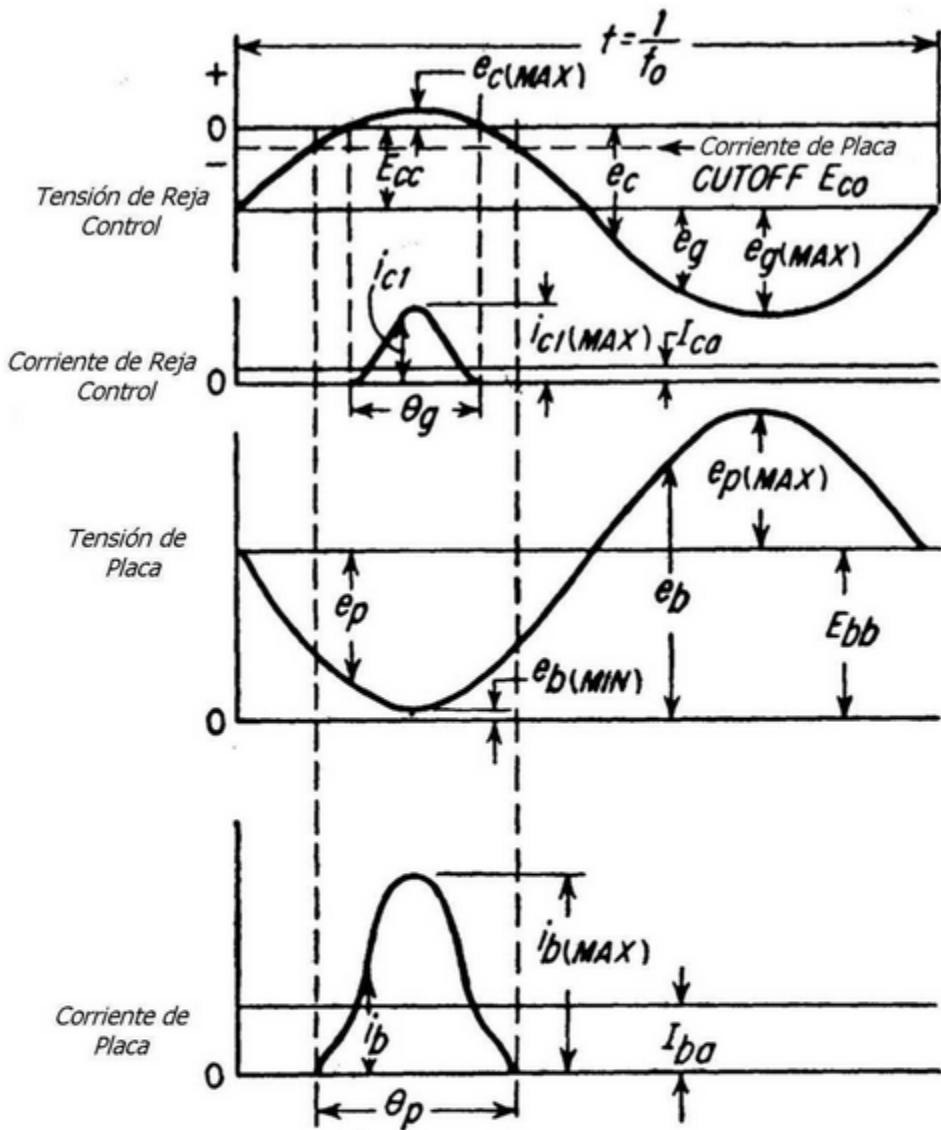
Note que para algunas potencias de salida, la potencia de reja debe incrementarse más del 100% al incrementar la eficiencia desde 75% al 85%.

Asociado con el incremento del manejo de la potencia, está un incremento en la polarización.

En efecto, el incremento en la polarización causa una reducción de θ_p y por esto un incremento en eficiencia. La potencia de salida se puede incrementar haciendo que la tensión instantánea de placa mínima $e_{b(min)}$ sea ligeramente superior que la máxima tensión reja-cátodo en el pico de excitación.

2.0.3 Relación entre las Tensiones y las Corrientes

La forma de onda de las tensiones y las corrientes de un amplificador Clase C de terminación única utilizando tetrodos o pentodos, se puede ver a continuación:



Formas de Ondas de Tensiones y Corrientes para un Amplificador Clase C

Para obtener altos valores de eficiencia, la tensión de control de polarización de reja (E_{CC}), generalmente se hace de 1.5 a 3 veces mayor que el valor requerido para la corriente de corte de placa. Más allá de la polarización de la válvula, la corriente de corte de placa asegura que la corriente circulará

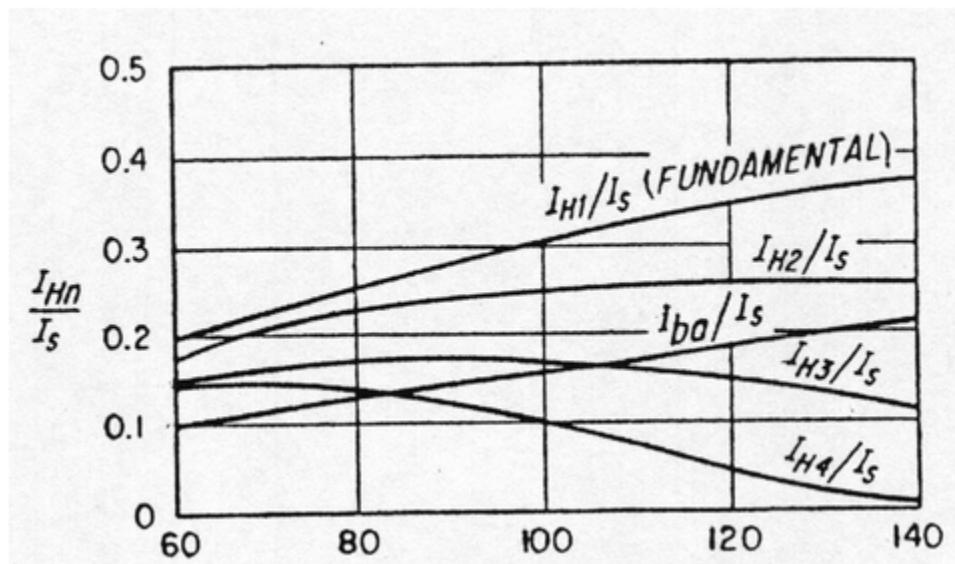
menos de 180° de cada ciclo. Si el circuito resonante de placa tiene un Q lo suficiente alto, la forma de onda de la tensión de salida de placa estará muy próxima a una senoidal, para una circulación de la corriente de placa menor de 180° . De esta forma, el circuito resonante de placa se sintoniza a la frecuencia de operación, estando la tensión de placa 180° desfasada con la tensión de excitación de reja.

La circulación de la corriente de reja es unos grados menores que la circulación de la corriente de placa, donde la corriente de reja circula durante una porción limitada del ciclo de trabajo, en el cual el control de reja está dentro de la región positiva.

La impedancia del circuito de reja-pantalla a la componente alterna del circuito de corriente de la misma está muy cerca ó es igual a cero y para la mayoría de los cálculos puede asumirse que la tensión de señal de la reja pantalla será cero. De modo que la corriente de reja control, reja pantalla y placa circulará por menos de $\frac{1}{2}$ ciclo de cada ciclo de excitación.

La relación entre valores picos a valores promedio suele ser relativamente grande, siendo mayor a medida que el ángulo de conducción se hace menor.

Una relación típica de los valores picos de los armónicos de la corriente de placa a corriente espacial pico I_s como una función del ángulo de conducción de la corriente de placa puede verse en la siguiente gráfica:



La corriente espacial I_s es la suma de los valores picos instantáneos de las corrientes de la reja control, reja pantalla y placa. Estas curvas se basan en la misma tensión de excitación pico positiva reja-cátodo, los mismos valores de corriente pico de reja y placa e iguales tensiones de alimentación.

Las variables son las impedancias del circuito de placa, polarización de reja y la amplitud de la tensión de excitación de reja. Puede observarse que para una corriente pequeña de placa el ángulo de conducción o ambos I_{ba}/I_s y I_{H1}/I_s se incrementa linealmente como la corriente de placa con el incremento del ángulo de conducción, mientras que el ángulo de conducción de la corriente de placa aumenta hasta 120 hay un notable incremento en la relación a la cual la pendiente de I_{H1}/I_s decrece. Por esta razón la eficiencia del circuito de placa se reduce si el ángulo de conducción se hace mayor a 120.

[]: