

AMPLIFICADORES CLASE C

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 senoide. 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.

Circuitos básicos:

Algunas configuraciones típicas de los amplificadores Clase C asociados a su circuito de neutralización se pueden ver en la siguiente figura:

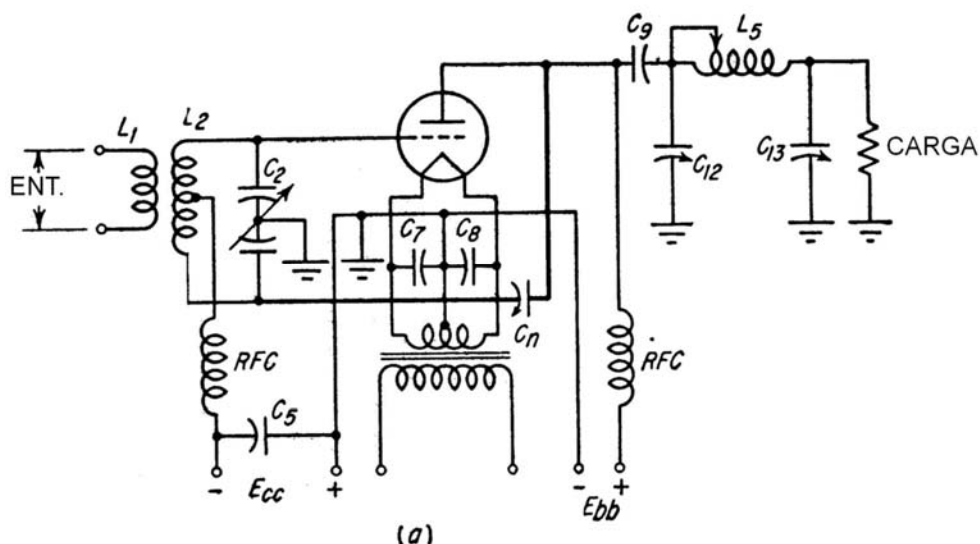
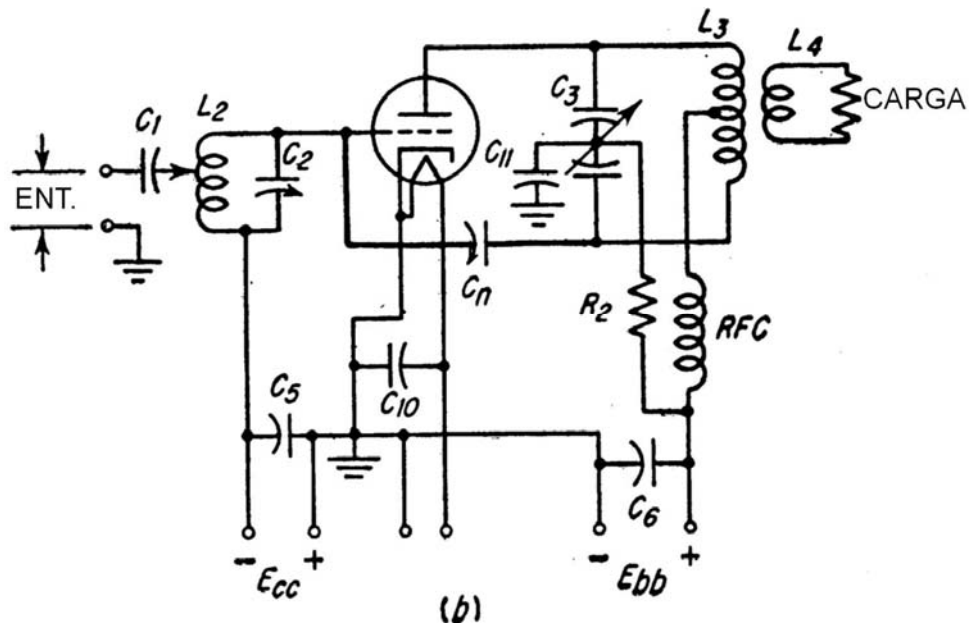
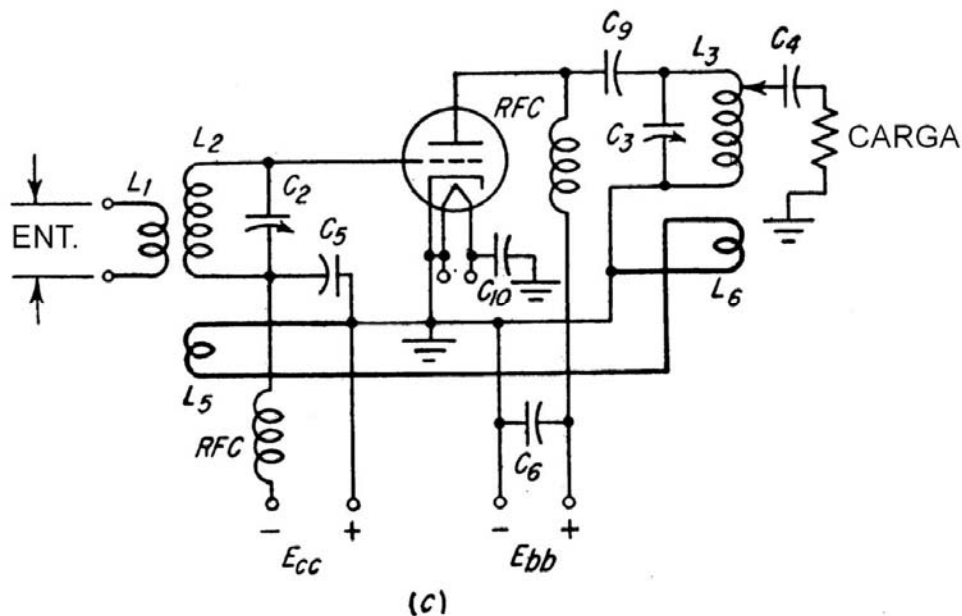


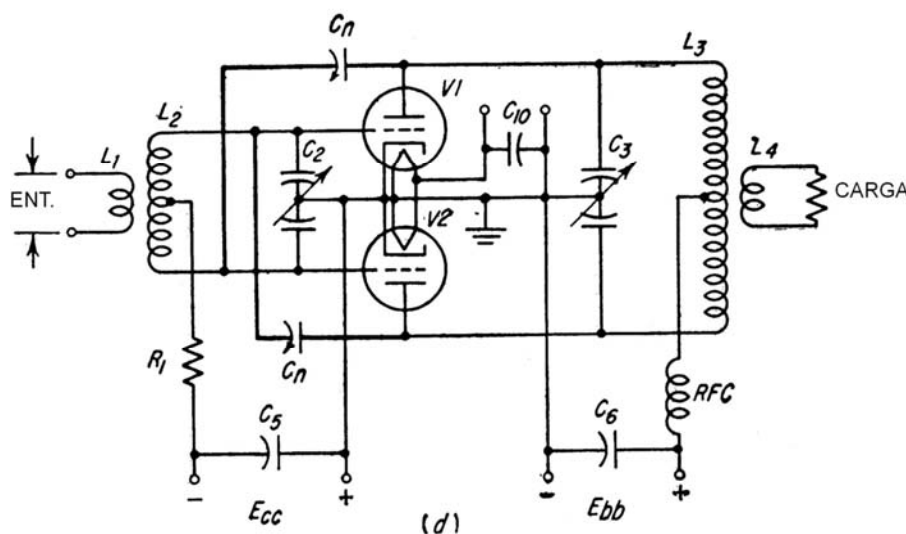
Fig. N° 7-1

**Fig. N° 7 -2**

Se debe notar que estos circuitos tienen la reja o el circuito de placa balanceado. El punto medio del inductor no está conectado al punto medio de los capacitores de sintonía. Conectar estos puntos, puede provocar una reducción de la eficiencia del circuito de placa, esto se debe al incremento en la circulación de corriente en el circuito tanque cuando el inductor o el capacitor de sintonía no son exactamente simétrico.

En este caso, el punto medio del capacitor C3 se ha colocado a potencial de señal cero por el capacitor C11, esto permite a C3, tener una baja tensión de ruptura, debido al resistor R2. Cuando el amplificador no es modulado en placa, el resistor R2 no es necesario, pudiendo conectar el punto medio de C3 directamente a la fuente de alta tensión.

**Fig. N° 7 -3**

**Fig. N° 7 -4**

Cuando el amplificador opera en alta frecuencia, rara vez se utilizan circuitos LC, en su lugar los circuitos de entrada / salida consisten en líneas coaxiales. En alta frecuencia también se suelen utilizar amplificadores con reja común, esto debido a que resultan ser más estables que los amplificadores con cátodo común.

Consideraciones de polarización: Polarización de cátodo, polarización fija y polarización por escape de reja pueden ser utilizada individualmente o en combinación para proveer la polarización a un amplificador Clase C.

La polarización por escape de reja es la más comúnmente utilizada y evita la necesidad de utilizar una fuente de polarización adicional. Esta polarización se regula por sí sola y tiende a ajustarse automáticamente al valor pico de la tensión de excitación de reja, de modo que elimina la necesidad de un ajuste crítico de la tensión de excitación.

Sin embargo, si se utiliza polarización de escape de reja, se deben tomar precauciones ya que en ausencia de señal de excitación, se puede producir una excesiva corriente de placa ó reja, que puede dañar la válvula. Frecuentemente, esta precaución requiere de otras formas de polarización como ser de cátodo o polarización fija. Esta protección también puede ser realizada, mediante la incorporación de un relé de sobrecarga de corriente en serie con la alta tensión de alimentación (este relé es usualmente colocado en el terminal de tierra para reducir los requerimientos de aislación). Las pérdidas de excitación causan un incremento apreciable en la corriente de placa, la cuál acciona el relé, proveyendo la protección deseada.

Tipo de válvulas: Se utilizan en amplificadores Clase C, Triodos, Tetrodos y Pentodos. Los Tetrodos son preferentemente empleados a los Triodos por su baja capacitancia interna reja-placa y por los menores requerimientos de excitación, estas consideraciones tienen especial importancia en aplicaciones de alta frecuencia como UHF.

Tipo de acoplamiento: Ambos tipo de acoplamiento, inductivo y capacitivo son utilizados en los circuitos de acoplamientos de reja y circuitos de salida de placa. El acoplamiento inductivo introduce mayor atenuación a los armónicos en la carga que los acoplamientos capacitivos.

Por otro lado el uso de un blindaje entre la inductancia del tanque y el circuito de salida, minimiza el acoplamiento capacitivo entre estos, disminuyendo la transferencia de armónicos a la carga.

Una red normalmente utilizada en el circuito de placa es una red π , esta red se comporta como el circuito resonante de placa introduciendo un incremento en la atenuación de armónicos en comparación con los circuitos resonantes paralelos de terminación única, proveyendo además una mejora en el ancho de banda de la impedancia de carga (mejor adaptación).

Neutralización: En los circuitos vistos en las figura 7-1 a 7-4, , si el circuito sintonizado de placa se encuentra ajustado a una frecuencia ligeramente mayor que la frecuencia de excitación de reja, la corriente que fluye a través de la capacidad reja-placa tiene una componente 180° desfasada con la tensión de excitación de reja. Si la capacitancia reja-placa es suficientemente grande y si las pérdidas de reja no son excesivas, el circuito de placa acoplará una suficiente cantidad de señal en el circuito de reja que provocará oscilaciones indeseadas en el amplificador.

Neutralizar consiste en aplicar una realimentación adicional entre la placa y reja de modo que refleje una resistencia en el circuito de reja, por medio de esto se cancela el efecto de la resistencia negativa producida por la corriente a través de la capacitancia reja-placa. Diferentes métodos de neutralización utilizados en amplificadores Clase C, se pueden ver en las figuras anteriores, en estos casos la neutralización utilizada actúa sobre un relativamente pequeño ancho de banda.

Una simple red de neutralización de banda angosta para un amplificador de terminación única puede realizarse por la conexión de un inductor y un capacitor en serie entre la reja y la placa. La magnitud de la reactancia inductiva es mayor que la magnitud de la reactancia capacitiva por una cantidad igual a la magnitud de la reactancia capacitiva reja-placa.

El resultado es que se le ha sumado a la red de neutralización una reactancia inductiva la cual neutraliza exactamente el efecto de la reactancia capacitiva reja-placa. Este particular tipo de neutralización es frecuentemente usado en amplificadores de RF. En válvulas con reja pantalla, la capacidad reja-placa es mucho menor que en los Triodos, consecuentemente los Tetrodos y Pentodos ordinariamente no necesitan ser neutralizados.

Oscilaciones parásitas: Son oscilaciones indeseadas que se denominan comúnmente como oscilaciones parásitas. La mayoría de los amplificadores y osciladores son susceptibles de presentar oscilaciones parásitas, lo que se debe evitar. Las oscilaciones parásitas pueden resultar en corrientes anormales, las que pueden acortar la vida de la válvula, la incapacidad de modular al 100% y fundamentalmente la interferencia con otros servicios.

Estas oscilaciones ordinariamente ocurren en frecuencias entre los 50 a los 200 Mhz ó en el rango de frecuencia entre los 200 a los 1200 Khz. Las oscilaciones parásitas de alta frecuencia en amplificadores Clase C, son usualmente debida a la inductancia entre los terminales de los circuitos de reja y placa y el circuito tanque resonante con la capacitancia Interelectródica y cualquier capacitancia externa.

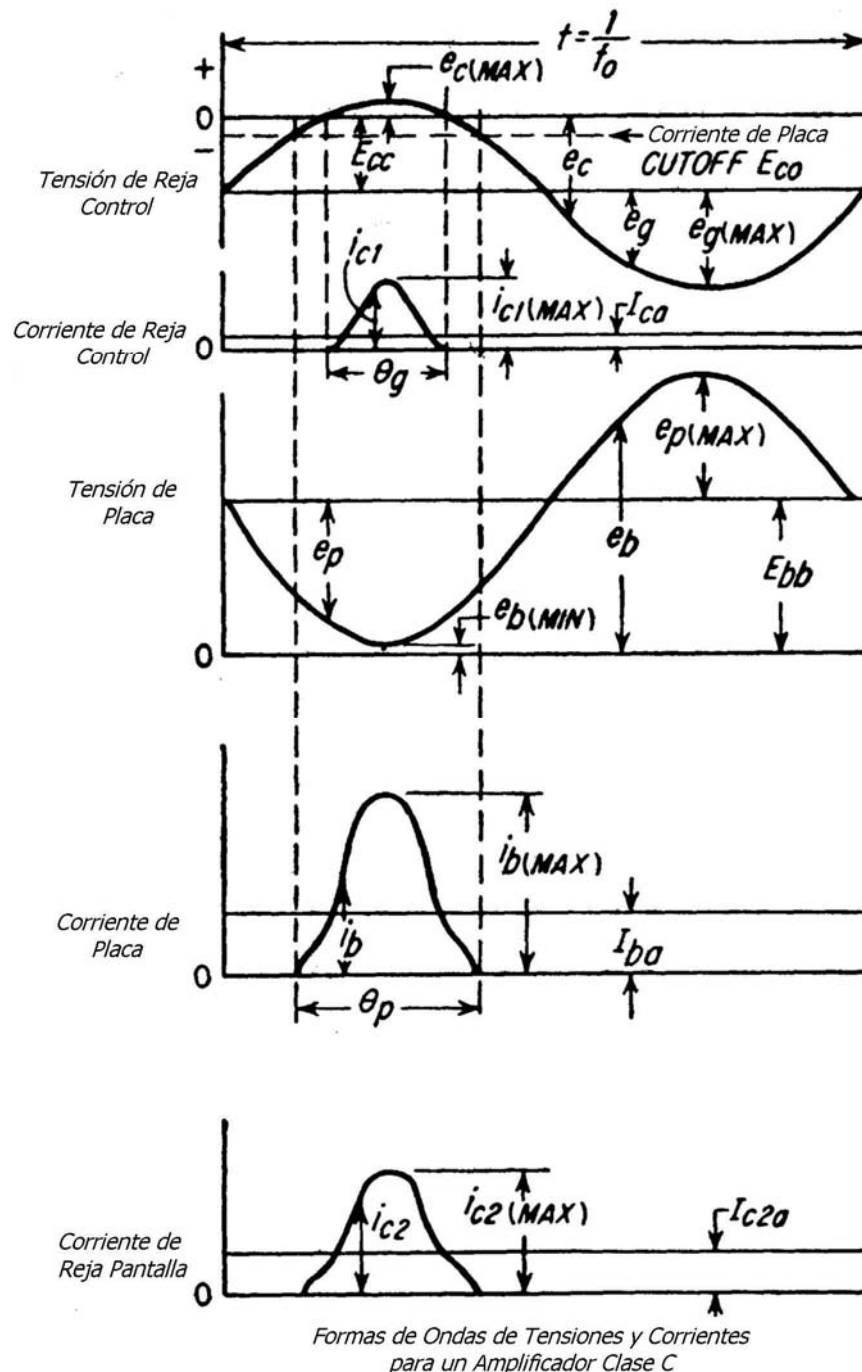
Las oscilaciones parásitas en alta frecuencia algunas veces pueden eliminarse por la resintonización del circuito de placa del oscilador que la genera a una frecuencia menor que la de reja, de modo que el amplificador no tenga grandes oscilaciones.

Un método de realizar esta re-sintonización, es hacer los terminales de reja más cortos que los terminales de placa de modo de hacer la inductancia de los terminales de placa mucho mayor a la inductancia de los terminales de reja. Igual efecto puede obtenerse colocando pequeñas inductancias, usualmente unos pocos μHy en cada terminal.

Otro método de supresión de oscilaciones parásitas es reducir el Q del circuito parásito, colocando resistencias de unos 50 a 100 ohms en cada terminal de reja y placa de la válvula. La combinación de pequeños inductores y resistencias en cada terminal es muy usado. En estas aplicaciones la inductancia es usada a la menor frecuencia de las oscilaciones parásitas.

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:

**Fig. N° 7 – 5**

Para obtener altos valores de eficiencia, la tensión de control de polarización de rejilla (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 menor 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:

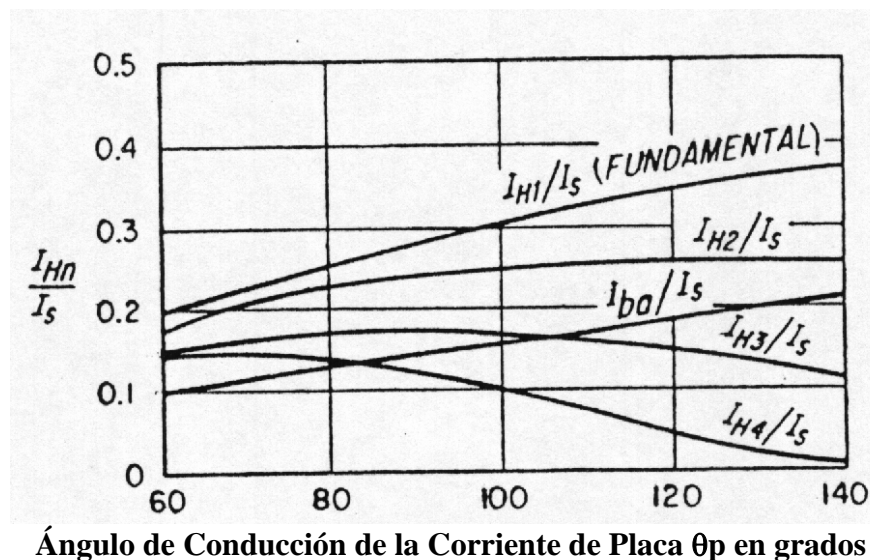


Fig. N° 7 – 6

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_{b0}/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° .

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 rejilla control, rejilla 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 triodo con las formas de ondas de tensión típicas de rejilla y placa incluidas.

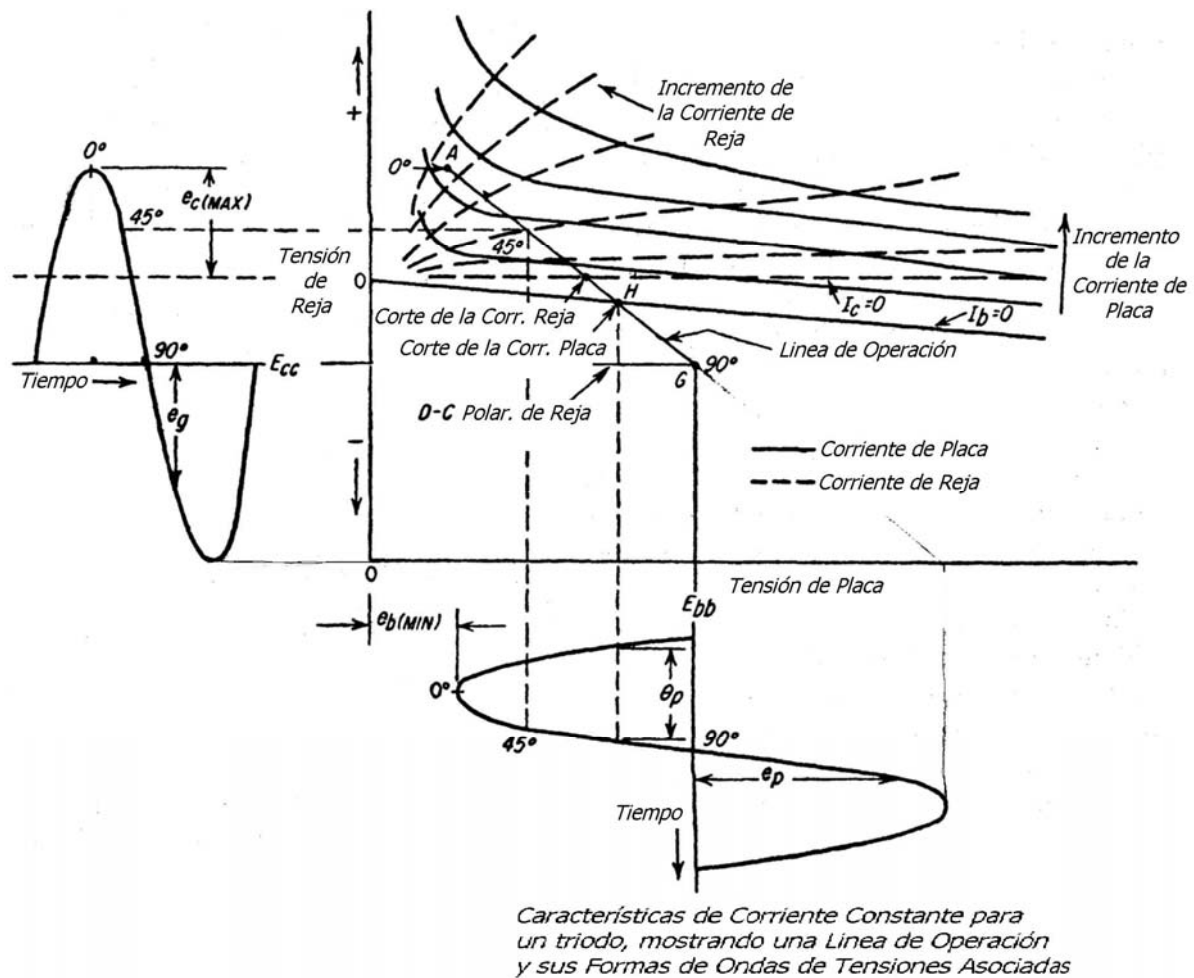


Fig. N° 7 - 7

Relación de Potencia del Circuito de Placa:

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 por:

$$P_o = \frac{e_p(\text{máx.}) I_{H1}}{2}$$

Donde: $e_p(\text{máx.})$ = valor pico de la tensión de placa de RF = $E_{bb} - e_b(\text{min.})$.

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 (paso 10 de diseño).

2 - La potencia de entrada de placa (P_{dc}) debe ser suministrada por la fuente de alimentación de corriente continua (dc) 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:

$$\eta = \frac{e_{p(max)} I_{H1}}{2 E_{bb} I_{ba}} \times 100$$

Si bien la potencia de entrada de placa es la potencia de salida de placa a la potencia de entrada, expresada como un porcentaje, 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:

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

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:

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

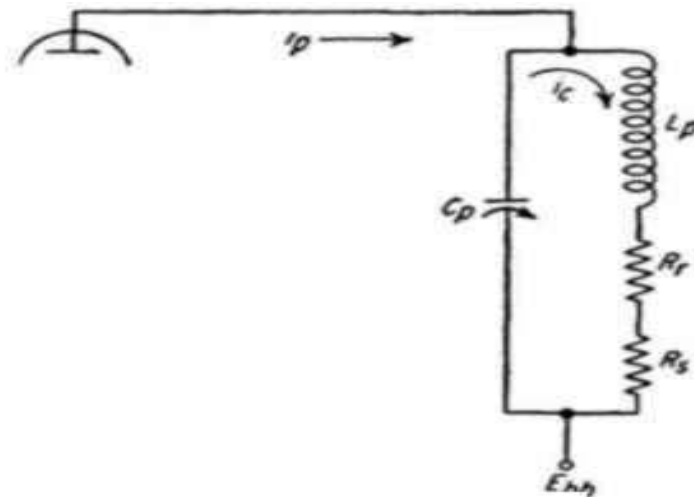
$$\cong (E_{bb} - E_{cc2})^2 / 2 P_o$$

Tetrodo o Pentodo

Donde E_{cc2} es la tensión de rejilla 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 dificultoso, 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_r en serie con el circuito inductivo de placa. En la figura siguiente:



Circuito de Placa equivalente de un Amplificador Clase C

Fig. N° 7 - 8

Donde R_s es la resistencia serie del inductor. Ordinariamente el Q del circuito tanque no cargado es suficientemente grande que la R_s puede ser despreciada. La resistencia r_b medida en los terminales del circuito de placa en resonancia puede ser calculada con:

$$b) \quad r_b = L_p / (R_r + R_s) \times C_p$$

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:

$$c) \quad Q_o = 2 \pi f_o L_p / R_r + R_s$$

Donde f_o es la frecuencia de resonancia.

Combinando las ecuaciones b y c resulta en una expresión más utilizada para r_b la cual es:

$$d) \quad r_b = Q_o / 2 \pi f_o C_p$$

De la ecuación d, puede observarse que hay un número infinito de combinaciones de Q_o y C_p que dan un valor igual de r_b . Sin embargo, Q_o no debe ser muy grande a fin de no provocar que la circulación de corriente en el circuito tanque sea excesiva, lo que puede causar pérdidas no deseadas, pudiendo 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:

$$i_c = 0.707 I_{H1}$$

Donde i_c = 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 Δf del circuito de placa cargado puede ser expresado en términos de Q_o y f_o por:

$$\Delta f = f_o / Q_o$$

Donde Δf = ancho de banda entre las frecuencias de $1/2$ (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:

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

De donde:

$$P_{c1} = e_{c(\text{máx.})} I_{ca}$$

Donde $e_{c(\text{máx.})}$ = 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:

$$\begin{aligned} P_1 &= I_{ca}^2 R_1 \\ &= E_{cc} I_{ca} \end{aligned}$$

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:

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

En alta frecuencia, por encima de 50 Mhz, la rejilla y el circuito de rejilla, 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 e.

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

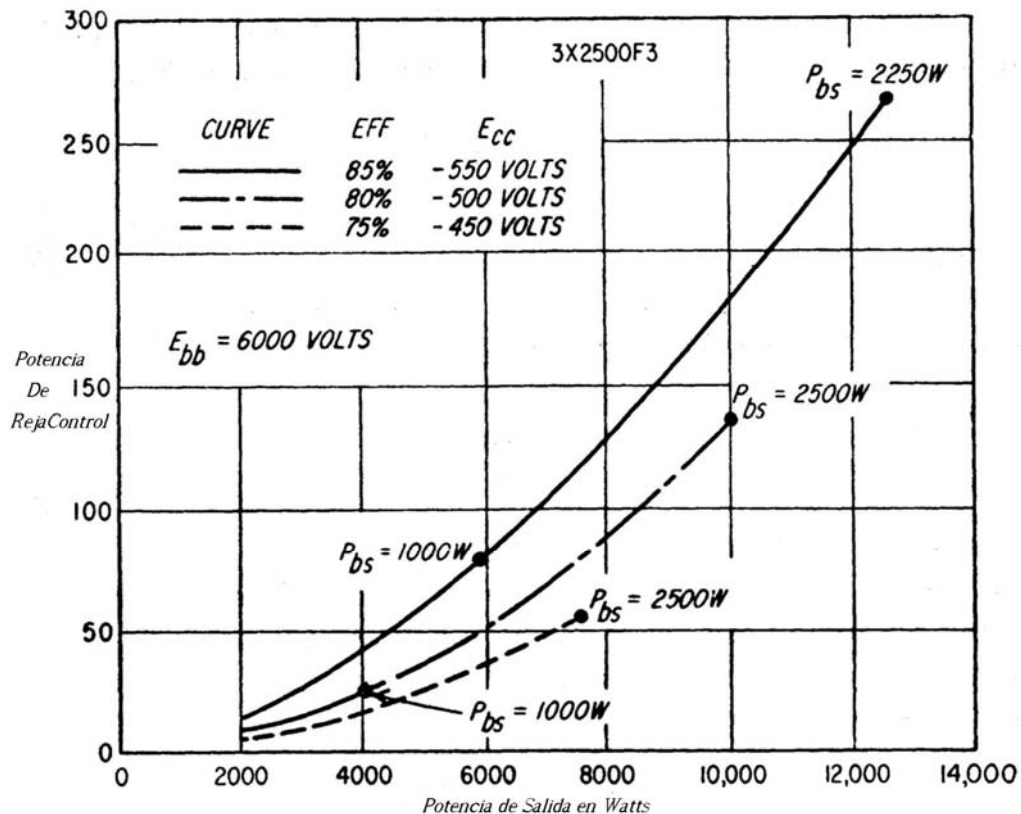


Fig. N° 7 - 9

Note que para algunas potencias de salida, la potencia de rejilla 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 rejilla-cátodo en el pico de excitación.

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 (Po):

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 50 Mhz., se debe considerar la pérdida en los dieléctricos de los materiales aislantes de la envolvente de la válvula.

$$P_o = 1,1 P_o (\text{solicitada}).$$

2 – Cálculo de la disipación de placa por tubo aproximada (Pbs):

$$P_{bs} = k P_o / n$$

$$n = \text{número de tubos}$$

k	0p 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:

- Disipación de placa debe ser mayor al encontrado en el punto anterior.
- Frecuencia de operación.
- Tensión de placa, grilla pantalla y filamento requerida.
- Sistema de enfriamiento (aire, agua, aire forzado).
- Características físicas: dimensión y forma, resistencia mecánica a golpes y vibraciones, etc.
- Potencia de excitación de grilla.
- Tipo de servicio (CW, AM, etc.)

4 – Determinación de la tensión de polarización Ebb:

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:

$$I'_{ba} = (P_o/n + P_{bs})/ E_{bb}$$

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: $i_{bm\acute{a}x} = 4 I'_{ba}$

esta es la relación aproximada entre el valor pico y el valor medio de la corriente de placa. Es necesario hacer una estimación de $i_{bm\acute{a}x}$ para realizar el análisis gráfico.

7 – Localización del punto A sobre las características de corriente constante:

El punto A determina: $e_{cm\acute{a}x}$, e_{bmin} , $i_{bm\acute{a}x}$, $i_{cm\acute{a}x}$, $i_{c2m\acute{a}x}$, 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 $E_c = E_c$, pero si la potencia de excitación de grilla es limitada, el potencial mínimo instantáneo de placa (e_{bmin}) debe ser algo mayor que la tensión pico positiva de rejilla ($e_{c(max)}$), 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. Si se elige e_{bmin} grande se 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.

Si el punto A se ubica de forma que e_{bmin} sea pequeño, la corriente de rejilla 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 rejilla 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 θ_p 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 E_{cc} .

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

Donde E_{co} = es la tensión de polarización de rejilla que causa el corte de la corriente de placa a la tensión de polarización de placa, se obtiene a partir de E_{bb} , subiendo hasta cortar la curva de corriente de placa =0. 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:

$$\theta_p = 2 \cos^{-1} (HG / AG)$$

La determinación de HG y AG se realiza midiendo las distancia 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 mas el pico positivo de la tensión reja cátodo, esto es:

$$e_{g\text{m}\acute{a}x} = |E_{cc}| + e_{c\text{m}\acute{a}x}$$

$$e_{p\text{m}\acute{a}x} = E_{bb} - e_{b\text{min}}$$

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 aproximados de la componente de 2° y 3° armónico:

- $I_{dc} = 0.0833(0.5 A + B + C + D + E + F)$
- $I_{H1} = 0.0833(A + 1.93 B + 1.73 C + 1.41 D + E + 0.52 F)$
- $I_{H2} = 0.0833(A + 1.73 B + C - E - 1.73 F)$
- $I_{H3} = 0.0833(A + 1.41 B - 1.41 D - 2 E - 1.41 F)$

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:

- $BG = AG \cos 15^\circ = 0.966 AG$
- $CG = AG \cos 30^\circ = 0.866 AG$
- $DG = AG \cos 45^\circ = 0.707 AG$
- $EG = AG \cos 60^\circ = 0.500 AG$
- $FG = AG \cos 75^\circ = 0.290 AG$

Se ubican estos puntos sobre la línea de operación, como se puede ver en la siguiente gráfica:

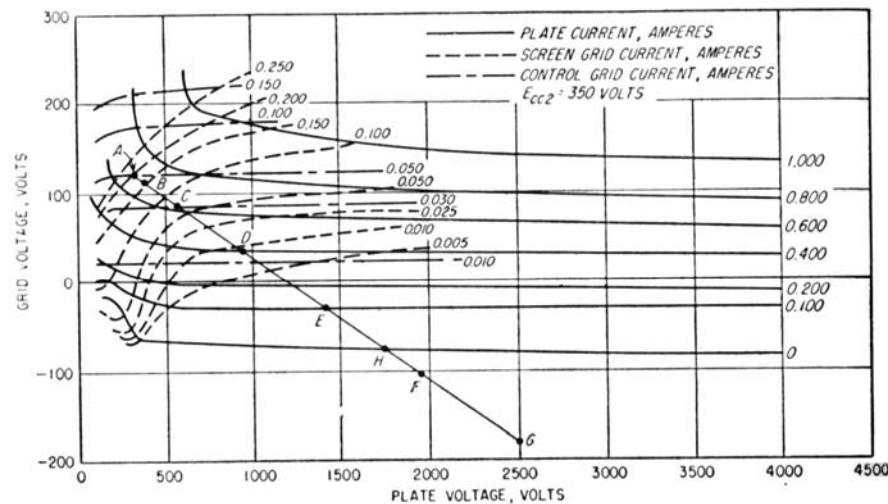


FIG. 4.22. 4-125A constant current characteristics.

Fig. N° 7 – 10

El punto F se ubicará por encima o por debajo del punto H según que el ángulo de conducción $\theta_p > 150^\circ$ o $\theta_p < 150^\circ$.

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:

$$P_{dc} = n E_{bb} I_{ba}$$

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:

$$\text{Rendimiento de placa:} \quad \eta = (P_o / P_{dc}) \times 100$$

$$\text{Potencia de disipación de placa:} \quad P_{bs} = E_{bb} I_{ba} - (e_{p\text{máx}} I_{H1})/2$$

$$\text{Potencia de disipación de reja pantalla:} \quad P_{c2} = E_{cc2} \times I_{c2a}$$

13 – Cálculo de la potencia total de excitación:

$$\text{potencia de excitación:} \quad P_t = n 1.1(P_{c1} + P_1)$$

$$P_{c1} = e_{c\text{máx}} I_{ca}$$

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

Se toma un 10 % adicional para tener en cuenta la 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:

$$R1 = |E_{cc}| / n I_{ca}$$

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

$$R1 = |E_{cc} - E_{c \text{ fija}}| / n I_{ca}$$

15 – Diseño del circuito tanque de salida:

$$r_b = (E_{bb} - e_{bmin})^2 / 2 P_o = (E_{bb} - e_{bmin}) / I_{H1}$$

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

$$Q_o L = \omega_o L_p / R_r + R_s$$

$$R_b = Q_o / 2 \pi f_o C_p \quad C_p = Q_o L / \omega_o r_b \quad L_p = 1 / \omega_o^2 C_p$$

$$Q_o = \omega_o L_p / R_s$$

Estimamos Qo para un buen rendimiento de aproximadamente 10.

$$R_s = \omega_o L_p / Q_o \quad R_r = (\omega_o L_p) / Q_o L - R_s$$

Amplificador Clase C Modulado en Placa

La 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 r-f, 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:

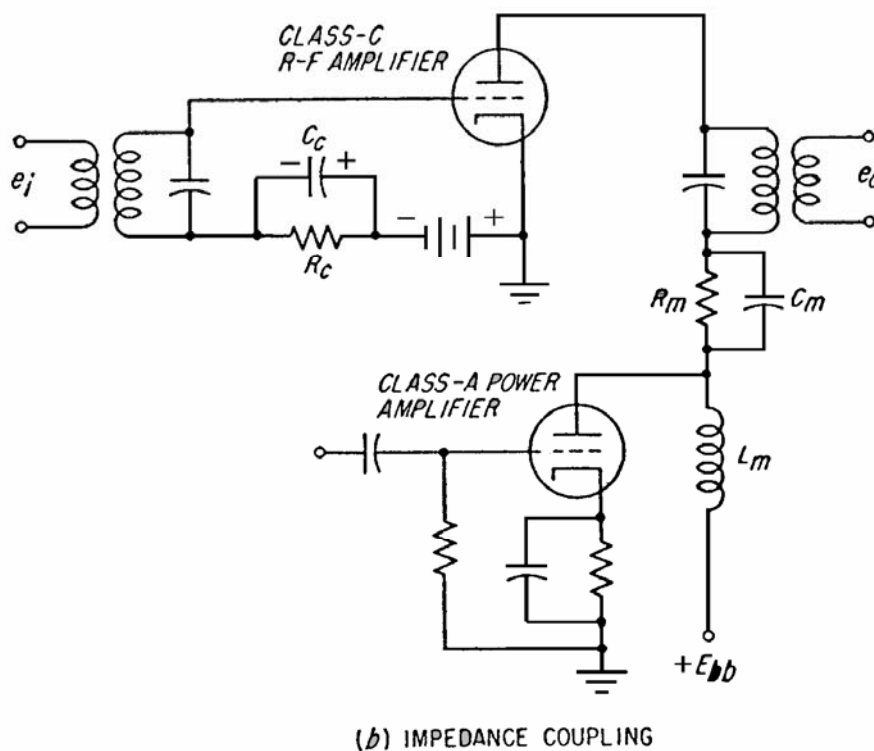


FIG. 5.4. Methods of plate modulation of a class C r-f amplifier.

Fig. N° 7 – 11

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 r-f, 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° 7-12

La línea de operación AA' de la Fig. 7-12 representa el sitio de todo los valores instantáneos de tensión y corrientes de reja y de placa durante el semiciclo 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 del r-f.

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 rejilla 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 rejilla 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.

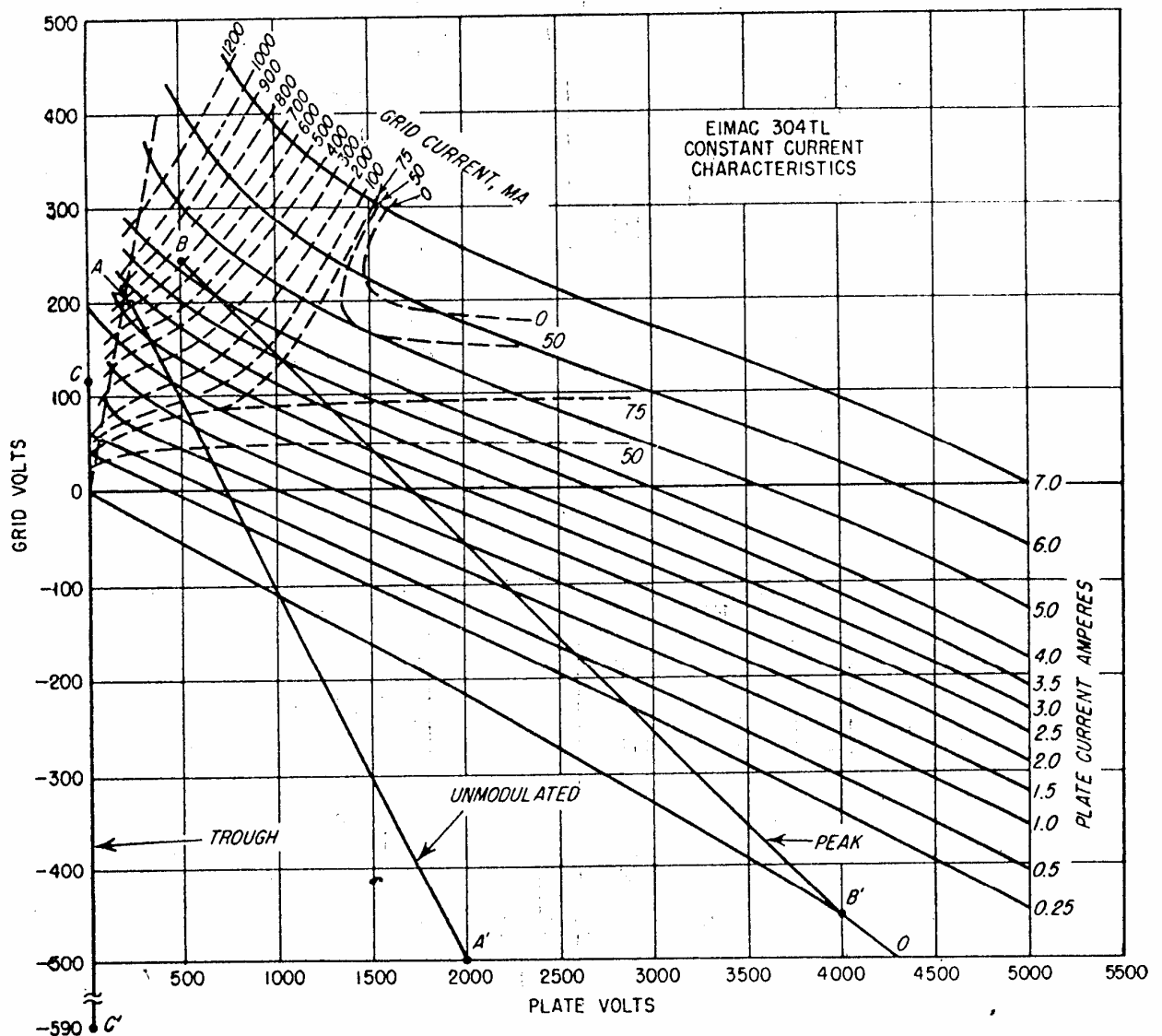


FIG. 5.5. Operating lines for a plate-modulated triode class C r-f amplifier having optimum ratio of fixed bias to grid-leak bias.

Fig. N° 7 – 12

La corriente de rejilla promedio se incrementa rápidamente si la tensión de placa se reduce a cero, mientras que la polarización negativa de escape de rejilla aumenta grandemente.

La situación exacta de CC' en la línea de tensión cero de placa es difícil de establecer gráficamente para los porcentajes altos de modulación debido a la inexactitud de las curvas características de la válvula a tensión cero de placa. Para obtener la mejor linealidad de modulación, una porción de la polarización para la rejilla se obtiene de una polarización fija y la otra parte se obtiene de una resistencia de escape de rejilla. Los valores de la polarización de escape de rejilla y la polarización fija que proporcionarán la mejor linealidad de modulación

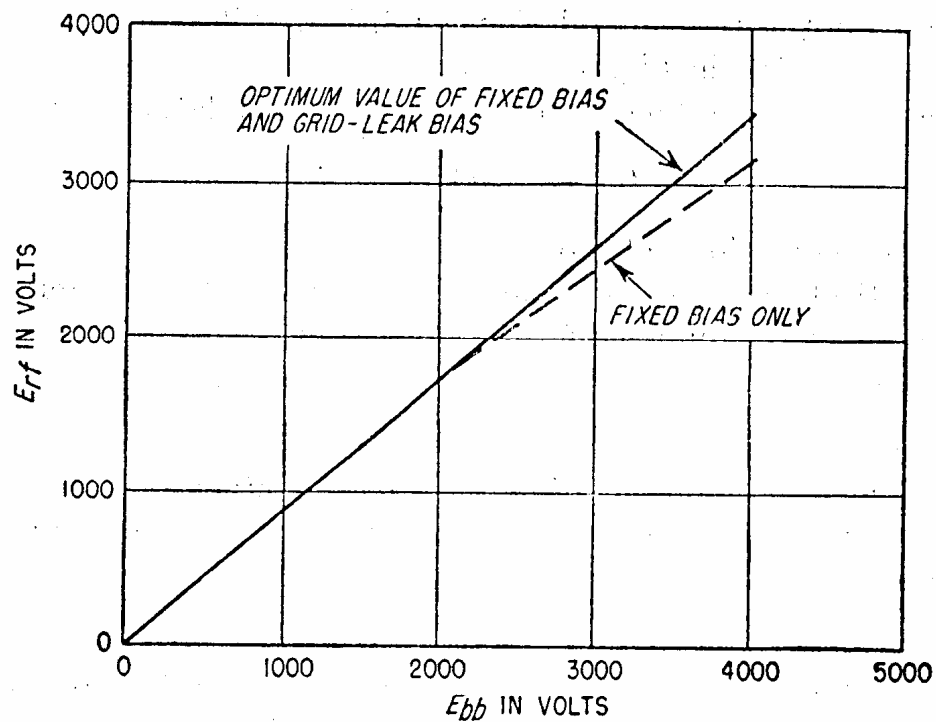
durante el ciclo completo de modulación están estrechamente relacionados, encontrando los valores de polarización fijo y de escape de rejá que localizan la línea de operación BB' en la pico del ciclo de modulación para proporcionar una potencia de salida que es $(1 + m)^2$ veces la potencia de portadora sin modular.

Así, en el ejemplo de Fig. 7 - 12 , un cambio en la polarización de escape de rejá de 50 voltios se requiere entre los AA' y BB' para obtener la modulación lineal. Cuando los valores de polarización de escape de rejá y la polarización fijo necesario para proporcionar la linealidad de la modulación entre las líneas de operación AA' y BB' está determinado.

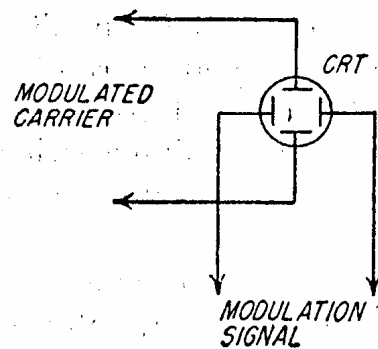
La localización de la línea de operación CC' en el valle de la modulación y todas las otras líneas de operación intermedia se establece. En la práctica, algún reajuste de la polarización fija y polarización de escape de rejá y se desea obtener la mejor linealidad de la modulación durante el ciclo completo. Haciendo la constante de tiempo de la resistencia de la rejá R_c . C_c y su polarización del r-f pequeño comparado al tiempo de un ciclo de la frecuencia más alta de la modulación, la polarización desarrollada a través R_c por la corriente de rejá promedio I_c seguirá cualquier variación en I_c causado por la tensión de modulación de la placa de la válvula.

El valor medio de la corriente de rejá disminuye cuando la tensión de alimentación de placa aumenta para una tensión de rejá y polarización fijos. Como resultado de la reducción en la corriente rejá a tensiones de placa altas, la polarización se reduce y la polarización de la rejá baja. La polarización de la rejá baja permitiendo al mismo tiempo aumentar la corriente placa pico y por consiguiente, la componente de corriente de placa en el amplificador a la frecuencia resonante. El ángulo de la conducción de placa también aumenta con la tensión de alimentación de placa causando un incremento adicional en la componente fundamental de placa.

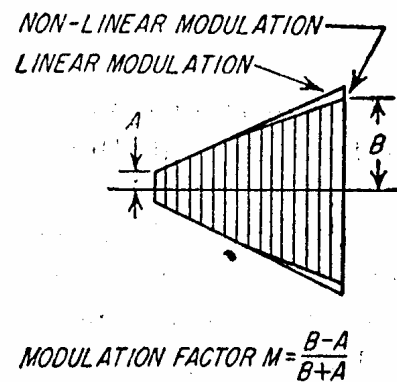
Por el ajuste apropiado de los valores de polarización de la rejá fijo y polarización de escape de rejá la componente fundamental de corriente de placa puede aumentarse muy linealmente con la tensión de alimentación de placa, produciendo modulación lineal de la portadora del r-f. Así, el efecto de polarización fija y la auto-polarización en la linealidad de la modulación pueden verse en Fig. 7 – 13/14. Aquí, la amplitud máxima de la tensión de r-f de salida se traza como una función de la tensión de alimentación de placa instantánea para la característica de la válvula de la Fig. 7 - 11 para la polarización fija y para la proporción óptima de fija y polarización de escape de rejá.



(a) MODULATION LINEARITY AS A FUNCTION OF TYPE OF BIAS EMPLOYED



(b) METHOD OF OBTAINING LISSAJOUS FIGURE



(c) LISSAJOUS FIGURE SHOWING MODULATION LINEARITY & MODULATION FACTOR

Fig. N° 7 - 13 y 14

Usando sólo polarización de escape de rejá, la tensión de salida de r-f aumentará más rápidamente con la tensión de placa creciente que el deseado para modulación lineal. En la práctica se puede perfeccionar la linealidad de modulación ajustando los valores relativos de polarización fija y polarización de escape de rejá, mientras se observa la modulación mediante las figuras de Lissajous, como se muestra en las Fig. anterior.

Cuando se modula la placa con una señal sinusoidal y asumiendo una eficiencia de la válvula constante, la potencia de entrada de placa, disipación de placa y potencia de salida del amplificador clase C se pueden expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_i = P_o (1 + m^2/2) \text{ (potencia promedio del circuito de entrada de placa)} \quad (1)$$

$$P_d = P_o (1 - \eta) (1 + m^2/2) \text{ (disipación de placa promedio)} \quad (2)$$

$$P_{rf} = P_o \eta (1 + m^2/2) \text{ (potencia de salida promedio).} \quad (3)$$

donde:

P_o = potencia de entrada de placa bajo condiciones de modulación cero.

η = eficiencia bajo condiciones de modulación cero.

m = índice de modulación

En la práctica la eficiencia de placa (η) no es constante a lo largo del ciclo de modulación, presentando un máximo cerca de modulación cero, disminuyendo durante el pico y valle del ciclo de modulación.

Como resultado la corriente promedio de placa y por lo tanto la potencia de entrada de placa de corriente continua se incrementará ligeramente durante la modulación lineal de placa del amplificador clase C, siendo la disipación de placa también algo superior que lo indicado por Ec. (1). El aumento en la potencia de entrada de placa durante la modulación es proporcionado por el modulador.

Para modulación sinusoidal con un solo tono modulado al 100 %, el modulador proporcionará un poco más de la mitad de la potencia de entrada de placa que requiere el amplificador en ausencia de modulación. De este modo se produce un incremento en la disipación de placa de la válvula debido a la modulación, el nivel de potencia de portadora debe ser algo menor que el valor máximo aceptable sin la modulación. La máxima disipación de placa para un amplificador clase C modulado en placa, cuando no está modulado, generalmente la especifica el fabricante de la válvula y su valor debe ser 2/3 de la máxima disipación de placa para esta válvula. Esto previene no exceder la disipación de placa máxima cuando se modula al 100 % con una señal senoidal.

1 Diseño de un Amplificador Clase C Modulado en Placa

El procedimiento siguiente puede utilizarse para determinar gráficamente las líneas de operación para un amplificador clase C con triodo modulado linealmente:

- 1 - Seleccionar una potencia de salida tal que la disipación de placa no exceda 2/3 del máximo valor por válvula, asumiendo una modulación del 100 %.

Seleccionar una tensión de alimentación de placa que no exceda la máxima tensión de placa permisible por válvula durante el pico de modulación.

Determinar la línea de operación para la válvula a ser utilizada para una condición de modulación cero, utilizando el procedimiento del diseño del capítulo anterior (diseño de un amplificador clase C) El resultado de este paso será la determinación de:

- Tensión de alimentación de placa.
- Tensión de placa pico en a-c.
- Corriente de placa pico en a-c.
- Corriente promedio de placa.
- Impedancia del circuito de placa.

- Tensión de polarización reja.
- Corriente promedio de reja.
- Tensión de reja pico.
- Potencia de reja.
- Disipación de placa para la condición de modulación cero, esto está representado por la línea de operación AA' en capítulo anterior.

2 - Determinar la tensión de placa para el máximo factor de modulación a ser utilizado.

$$E_{b\max} = (1 + m)E_{bo}$$

donde: E_{bo} = Valor de E_b para modulación cero.

Construya una línea vertical a lo largo de este valor de E_b en las curvas de corriente constante.

3 - Determinar el valor máximo en el pico de r-f de la tensión placa $e_{p\max}$, asumiendo modulación lineal.

$$e_{p\max} = (1 + m)e_{po}$$

donde: e_{po} = valor de la tensión de r-f máximo de placa para modulación cero.

4 - Determine el valor instantáneo mínimo de tensión de placa durante el pico de modulación.

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

Construya una línea vertical a lo largo de este valor de E_b en las curvas de corriente constante.

5 - Determine el valor máximo de la componente fundamental de corriente de placa requerida para modulación lineal en el pico de modulación.

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

donde: r_b = resistencia de placa-cargada a la frecuencia resonante de circuito de placa.

6 - Determinar un valor de ensayo para la corriente de placa instantánea.

Localice la intersección de la línea $e_{b(\min)}$ con la curva de corriente de reja constante que corresponde a la corriente de reja en el pico de balance de la tensión de reja con cero de modulación en la línea de operación (punto A en Fig. 7 - 12). Marcar esta intersección como punto B.

7 - Construir un ensayo de la línea de operación.

- Obtener el valor de la tensión de r-f de reja $e_{g(\max)}$ desde el valor instantáneo de la tensión de reja e_c en el punto B.
- Marcar la intersección de este nuevo valor de polarización de la reja y la línea que corresponden a $E_b = E_{b(\max)}$ como el punto B'.
- Construya un ensayo de la línea de operación entre los puntos B y B'.
- Calcular el valor pico de la componente fundamental de la corriente de placa para esta línea de operación de Eq. (4).

$$I_{H1(\max)} = 1 / 12 (a + 1.93b + 1.73c + 1.41d + e + 0.52f). \quad (4)$$

- Sí el valor de $I_{H1(máx)}$ para esta línea de operación está dentro del 5 % del valor requerido para la modulación lineal (paso 5), la línea de operación seleccionada es la deseada para modulación lineal dentro de la exactitud permitida por este método.
- Si $I_{H1(máx)}$ no está dentro del 5 % del valor requerido, la línea de operación BB' debe desplazarse verticalmente hacia arriba o abajo según sea conveniente, manteniendo la misma pendiente y los mismos límites de $e_{b(min.)}$ y $E_{b(máx)}$, hasta que el valor de $I_{H1(máx)}$ calculado de la nueva línea de operación se encuentre dentro de la tolerancia apropiada.

8 - Determinación de los valores apropiados de polarización fija y polarización de escape de rejilla.

El cambio requerido en la polarización de la rejilla entre las dos líneas de operación para la modulación lineal ha sido determinado por el paso 7. El valor de resistencia de escape de rejilla la cual provee este cambio en la polarización cuando la tensión de placa de la válvula está variado desde E_{b0} a $E_{b(máx)}$ puede ser determinado por un cálculo exacto del valor promedio de la corriente de rejilla para cada línea de operación mediante la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{E_{cc1} - E_{cc2}}{I_{c1} - I_{c2}} \quad (5)$$

donde: E_{cc1} = Tensión de polarización para modulación cero.

E_{cc2} = Tensión de polarización para el pico máximo de modulación.

I_{c1} = Corriente promedio de rejilla para modulación cero.

I_{c2} = Corriente promedio de rejilla para el pico máximo de modulación.

Debido a que el cambio en la corriente promedio de rejilla es aproximadamente 10 % de I_{c1} , las ecuaciones aproximadas para la determinación de I_{c1} e I_{c2} vistas en el diseño del amplificador clase C (análisis de Chaffe), que presentan una exactitud de aproximadamente el 5%, no pueden utilizarse para proporcionar valores de I_{c1} y I_{c2} de exactitud suficiente para el uso en Ec. (5). Como la determinación más precisa de la corriente promedio de rejilla resulta ser muy laboriosa. Es más conveniente determinar en forma experimental estos valores cuando se construye y ensaya el amplificador, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Con $R_c = 0$, colocar la tensión de placa en E_{b0} con un valor de polarización fija igual al valor especificado en el punto A'.

1. Modular al amplificador con una tensión senoidal y con el índice de modulación deseado en la entrada de la válvula.
2. Observar la figura de Lissajous en la envolvente de modulación Fig. 7-14 b y c. Aparecerá una no-linealidad como es indicado en Fig. 7-13a para la polarización fija.
3. Quitar la modulación, aumentar R_c , manteniendo la constante de tiempo $R_c C_c$ dentro del rango apropiado, disminuir el valor de la polarización fija hasta el mismo valor de polarización presente antes.
4. Aplicar modulación y verificar la linealidad sobre la figura de Lissajous. Variar el valor de R_c y el valor de polarización fija, siempre manteniendo el mismo valor de polarización total sin modulación, hasta obtener linealidad óptima de modulación.

Eficiencia: La eficiencia total de un amplificador clase C modulado en placa, se puede incrementar ligeramente aplicando modulación al amplificador excitador de rejilla, por variación de la amplitud de la tensión de r-f excitadora en concordancia con la modulación de placa, la

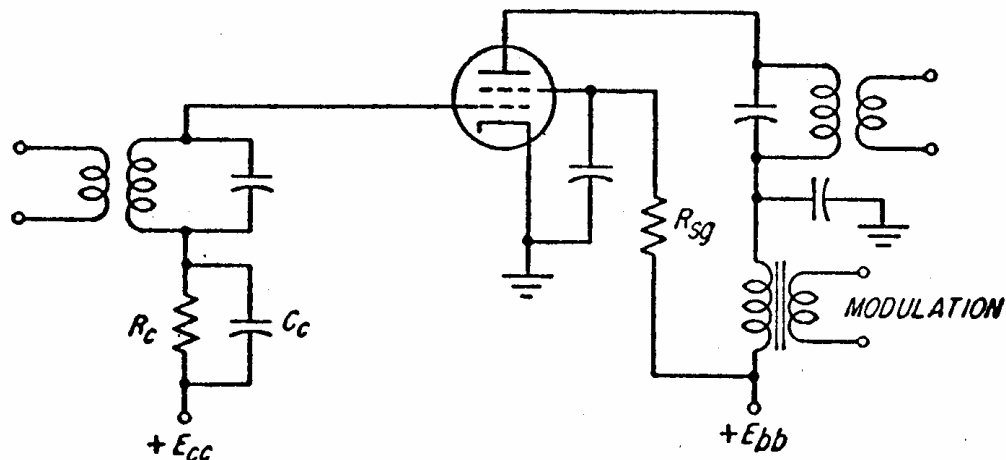
cantidad de polarización de escape de reja puede hacerse aumentar cuando la tensión de placa aumenta, manteniendo la modulación lineal de placa.

Mediante el ajuste apropiado de R_c y el factor de modulación de portadora, el ángulo de conducción de placa puede mantenerse casi constante en un valor óptimo, mientras se mantiene la eficacia de placa constante a lo largo del ciclo de la modulación.

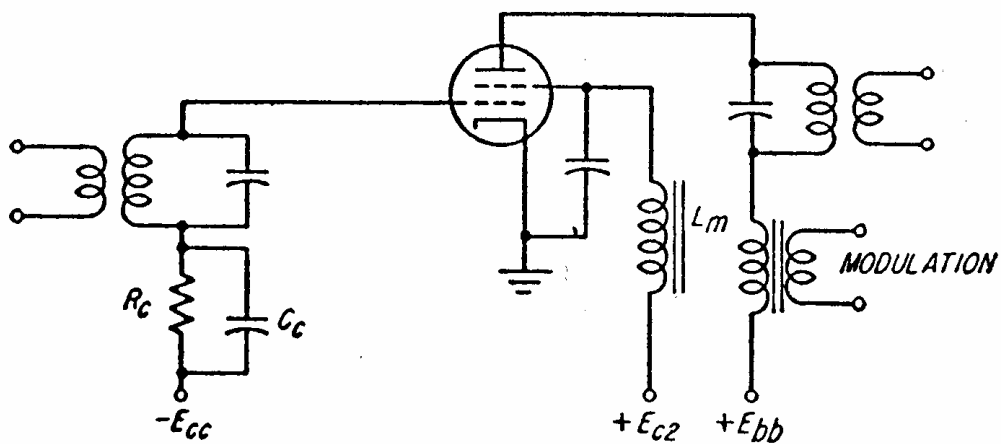
En amplificadores clase C que utilizan tetrodos ó pentodos, si se desea un factor de la modulación alto, a la modulación de placa se la debe acompañarse por modulación de la reja pantalla. La cantidad requerida de modulación de pantalla normalmente puede lograrse por cualquiera de lo siguiente métodos:

- (1) Tensión de la pantalla obtenida por una serie de resistencia de la tensión de alimentación de placa sin modular.
- (2) Tensión de la pantalla obtenida de una fuente de alimentación separada a través de una inductancia.
- (3) Modulación de Pantalla a través de un bobinado separado en el transformador de modulación de placa.

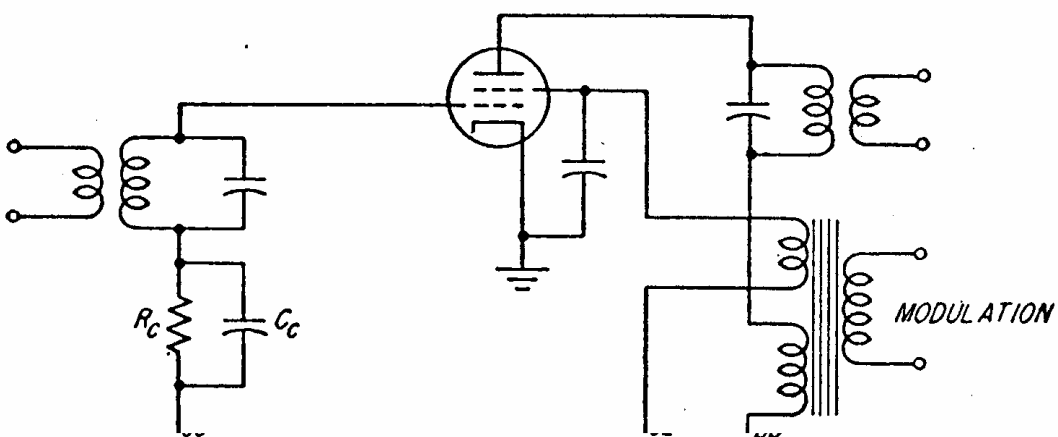
Para algunas alternativas de modulación del amplificador clase C utilizando tetrodos o pentodos, esto se puede ver en la figura siguiente:



(a) SCREEN SERIES DROPPING RESISTOR



(b) SERIES SCREEN INDUCTANCE



(c) SEPARATE WINDING ON PLATE MODULATION TRANSFORMER

Fig. N° 7 – 15 (Métodos para obtener modulación de placa y de pantalla en un amplificador clase C utilizando tetrodos y pentodos)

En el método de resistencia e inductor serie, la modulación de pantalla se logra por la variación inversa de la corriente de pantalla con la tensión de placa. Para minimizar cualquier

cambio de fase, entre la tensión de modulación placa y de pantalla en los métodos (1) y (2), el condensador de bypass de pantalla debe hacerse tan grande de forma de desviar la radiofrecuencia de la pantalla a tierra. El método de la resistencia en serie es el más frecuentemente usado, debido a su simplicidad y además porque elimina la necesidad de una fuente de alimentación de pantalla separada. El valor de esta resistencia serie de pantalla se puede obtener mediante:

$$R_{sq} = E_{bb} - E_{c2} / I_{c2} \quad (6)$$

donde: E_{bb} = tensión de alimentación de placa

E_{c2} = tensión de la pantalla deseada sin la modulación.

I_{c2} = Corriente de pantalla de d-c cuando la tensión de pantalla es igual a E_{c2} y en ausencia de modulación

La amplitud pico de la tensión de modulación de pantalla requerida para 100 % de modulación es aproximadamente $0.75 E_{c2}$. Esto es normalmente especificado por los fabricantes de la válvula para las condiciones de operación dadas.

Es difícil de determinar gráficamente, las condiciones de operación para un tetrodo o pentodo modulado en placa, esto se debe a que una nueva familia de curvas características de corriente constante se requiere para cada valor de tensión de pantalla.

El modulador de un amplificador clase C es un amplificador de potencia de audio, si se usa la impedancia de acoplamiento entre el modulador y el amplificador de r-f como se ve en Fig. 7-11, para esto se requiere que el amplificador de potencia sea lineal y de terminación única. Como se ve en la Fig. 7-11, bajo condiciones de modulación cero la corriente de placa inmóvil de la válvula del amplificador de potencia será alta y la eficacia combinada del amplificador del r-f y el modulador será bastante baja. Por esta razón, la impedancia de acoplamiento se usa raramente excepto en las aplicaciones de baja potencia.

Cuando se utiliza acoplamiento a transformador, entre el modulador y el amplificador del r-f, la tensión de d-c de placa debe reducirse por debajo de E_{bb} , donde la tensión de modulación pico es igual a la tensión de placa del amplificador de r-f-modulado al 100 %.

Cuando se usa acoplamiento a transformador entre el modulador y el amplificador del r-f, el modulador normalmente lo constituye un amplificador de potencia push-pull clase B o clase AB1 o AB2. Bajo estas condiciones de operación, la corriente de placa de cero-señal de la válvula del modulador es muy pequeña y la potencia de señal de modulación cero consumida en el modulador es aproximadamente 5 a 20 % de la potencia de salida máxima.

El transformador de modulación debe asegurar que la impedancia de carga presentada por la placa del amplificador del r-f se transforme a la impedancia óptima para el amplificador de potencia modulador, en el primario del transformador. Para modular las frecuencias más baja que la frecuencia de la portadora la impedancia presentada por el amplificador del r-f es:

$$R_l = E_{bb} / I_b$$

donde: E_{bb} = tensión de alimentación de placa

I_b = corriente de d-c de placa sin modulación

Cuando las frecuencias de modulación superiores están próximas a la frecuencia de portadora, para que el circuito resonante de placa tenga una impedancia apreciable a las frecuencias de modulación, la ecuación anterior debe modificarse para incluir esta impedancia en series con la válvula. Esta condición puede requerir una consideración especial en el diseño de

la respuesta en frecuencia del modulador, para compensar este factor, los filtros especiales en la salida el circuito resonante suprimen las frecuencias de modulación superiores debajo de un valor aceptable. El modulador y transformador de modulación deben ser capaz de entregar una potencia pico aproximadamente igual a un medio de la potencia de entrada de placa sin modular de amplificador del r-f. Si se emplea modulación sinusoidal al 100 %, el transformador de modulación debe diseñarse para manejar la corriente del secundario de d-c (I_b).