

MODULACIÓN DE AMPLITUD

Como se mencionó anteriormente, modular una portadora de radiofrecuencia significa inyectarle de alguna forma, a la mencionada portadora, la información que se desea trasladar de un punto a otro. La modulación se define como el proceso de transformar información de su forma original a una forma más adecuada para la transmisión. Existen distintas formas de inyectarle esa información (modulación) a una portadora, una de esas formas, es la conocida como modulación de amplitud. Existen otros tipos de modulaciones como por ejemplo modulación en fase, modulación de frecuencia, modulación en banda lateral única (**BLU**), modulación por pulso, modulación por pulso codificado y una gran variedad de formas sofisticadas de modulación.

En el caso de modulación en amplitud, esta fue la primera que se practicó, esto es debido a la simplicidad en su generación y por la relativamente buena calidad en la transmisión de la información que se puede obtener, por esto su uso se generalizó y difundió rápidamente. En la actualidad los sistemas de **AM** se los utilizan exclusivamente en transmisiones de emisoras comerciales, broad-casting, de mucha potencia, esto se debe a que además de ser muy simple de generar, es también simple y económico de recuperar la información, como su uso es masivo es de gran importancia que los receptores a utilizar sean económicos y de buena calidad, se debe tener en cuenta que la calidad obtenida es siempre menor que la que se obtiene con modulación en frecuencia.

La portadora utilizada es una señal cuya frecuencia es lo suficientemente alta como para radiarse de manera eficiente y propagarse por el espacio libre, a esta se la llama radiofrecuencia. En las primeras épocas la modulación era a todo o nada, es decir, consistía en modular con una onda cuadrada, esto provocaba una supresión de la portadora o no. Así se efectuaban las primeras modulaciones en amplitud, esto se puede ver en la siguiente gráfica:

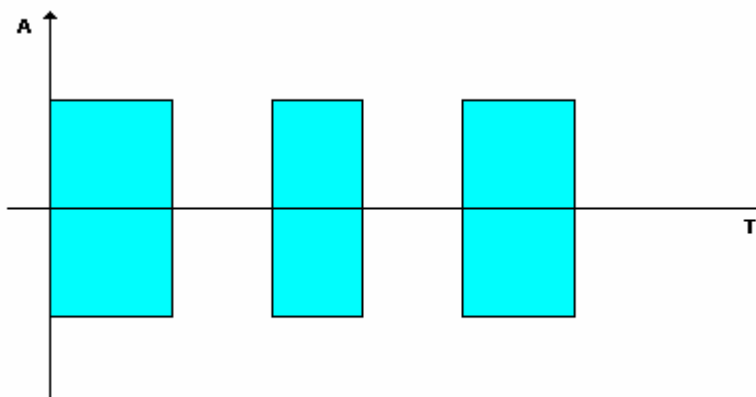
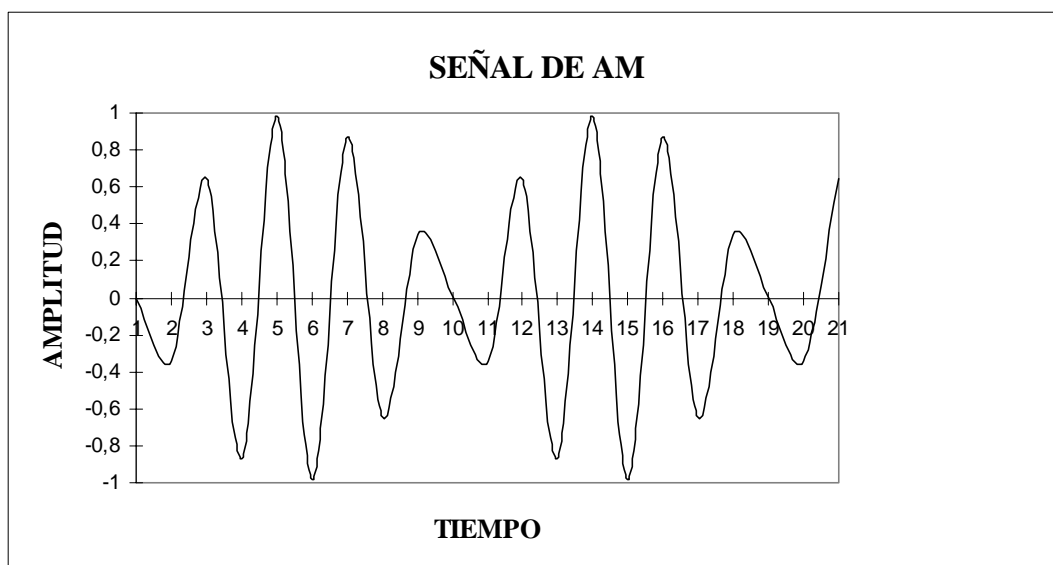


Fig. N° 6-1

Posteriormente se utilizó modulación en amplitud con una señal analógica (senoidal), esta señal senoidal utilizada es una señal de audio, normalmente de telefonía, pudiendo ser también una señal proveniente de grabaciones musicales. Una señal de radiofrecuencia modulada en amplitud por una señal senoidal se puede ver en la siguiente gráfica:

**Fig. N° 6-2**

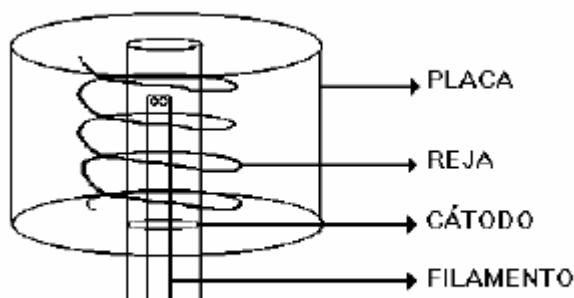
Para obtener modulación en amplitud existen varios métodos, utilizándose básicamente Válvulas de alto vacío o Transistores. En el caso de utilizar una válvula, por ejemplo: se puede modular en los distintos electrodos que esta posee. Las válvulas de alto vacío son muy utilizadas en etapas de salida de gran potencia en equipos transmisores, por encima de 500 W o 1 kW se suele utilizar amplificadores valvulares, hasta algunos cientos de kWatt. existen válvulas cerámicas pequeñas que pueden trabajar con potencias de 1, 2 o 5 kW. En el caso de utilizar transistores, estos pueden trabajar con potencias del orden de 1 o 2 kW.

Características de las Válvulas de alto vacío:

Existen distintos tipos de válvulas las que básicamente se diferencian por el número de electrodos que poseen, de esta forma podemos encontrar: triodos, tetrodos o pentodos. El triodo posee tres electrodos además del filamento (**Cátodo**, **Reja control** y **Placa**), el tetrodo posee un electrodo adicional (**Reja pantalla**) y el pentodo posee otro electrodo más (**Reja supresora**), además de la pantalla. El pentodo tiene en definitiva 3 rejillas o grillas: reja control, reja pantalla y la reja supresora.

El triodo tiene el problema de presentar una gran capacidad interelectrónica, motivo por el cual no se lo puede utilizar en altas frecuencias, principalmente es la capacidad de entrada-salida (entre la grilla y la placa) la más problemática.

Físicamente el triodo se compone de un cilindro metálico (**Cátodo**) dentro del cual se ubica el filamento, este último es el encargado de calefaccionar el cátodo para que este emita. Rodeando a este cilindro se ubica una espiral (Reja control) separada una cierta distancia del cátodo y con un cierto espaciado entre espiras. Rodeando a la reja y a una mayor distancia que la anterior se ubica la Placa, esta generalmente es también un tubo cilíndrico. Esto significa que se tienen dos cilindros y la reja entre ellos, es decir, se establecen grandes capacidades entre los electrodos. La capacidad más importante es la que aparece entre la reja de control (entrada) y la placa (salida), esta capacidad limita el uso en alta frecuencia del triodo, no obstante utilizando configuraciones especiales se utiliza en alta frecuencia en etapas de potencia. Lo mencionado anteriormente se puede visualizar en la siguiente figura:

**Fig. N° 6-3**

Las distintas configuraciones en las que se utilizan válvula de vacío son: reja común, cátodo común y placa común. La configuración utilizada mas comúnmente es cátodo o reja común. Si se utiliza la configuración reja común, la señal ingresa por el cátodo y sale por la placa, esto significa que la capacidad salida-entrada será la capacidad placa-cátodo, al tener un electrodo entre ellos (reja control) este hace de pantalla y disminuye la capacidad. Por lo que en la configuración reja común se lo puede utilizar al triodo en alta frecuencia y alta potencia. Otra alternativa para disminuir la capacidad entrada-salida (entre reja y placa), es agregar un electrodo entre medio, este electrodo hace de pantalla y divide la capacidad entrada-salida, a este electrodo que se le agrega se lo llama **Reja pantalla**, a esta nueva válvula se la llama **Tetrodo**. Esto último disminuyó el problema de la capacidad, pero empeoró la repuesta y la linealidad debido a que esta reja pantalla genera una zona de resistencia negativa en la curva de salida, esto se debe a que se produce un agrupamiento de cargas en determinadas condiciones que hace que a mayor tensión en placa se tenga menor corriente de placa en lugar de mayor, esta zona es la que presenta una resistencia negativa, ocasionando una gran alinealidad. Para corregir esta zona de resistencia negativa que presenta el tetrodo, se coloca otra reja llamada **supresora**, la que se conecta a masa, esto constituye la válvula llamada **pentodo**.

Otra alternativa es utilizar el llamado **Tetrodo de haces dirigidos**, es decir se coloca un par de placas entre la reja pantalla y la placa de forma de dirigir el haz de electrones, de tal manera que se elimina la zona de resistencia negativa. Este par de placas cumplen la misma función que una nueva reja. El tetrodo de haces es el que normalmente se utiliza.

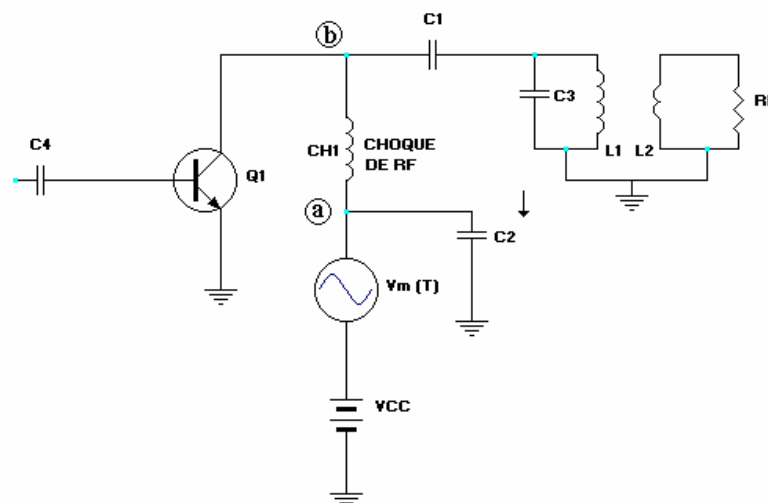
El método más simple y eficaz para obtener modulación en amplitud consiste en atacar con la modulación la etapa de potencia de salida de RF. No conviene modular en etapas anteriores debido a que en este caso, el amplificador de potencia a emplearse debería ser un amplificador lineal, ya que de utilizarse un amplificador clase **C** en la etapa de salida, se distorsionaría en forma inconveniente la modulación, siendo necesario en consecuencia utilizar amplificadores clase **B** como mínimo.

Salvo en casos especiales, en los transmisores de **AM** siempre se modula en la etapa de salida, atacando con la señal modulante la tensión de alimentación, en este caso si se pueden utilizar amplificadores clase **C** aprovechando el alto rendimiento que estos presentan.

En caso de utilizar un transistor en el amplificador de salida, lo normal es modular en el circuito de colector, variando la tensión de alimentación según la modulación. En el caso de utilizar una válvula de vacío lo más usual es modular en el circuito de placa, pero también se puede modular en el circuito reja control, en circuito de reja pantalla, o en el cátodo. Cada una de estas alternativas me permite obtener características especiales de modulación. De todas estas alternativas el tipo de modulación más utilizado es la modulación de placa.

Transistor modulado en colector

En este caso la modulación se inyecta en serie con la tensión de alimentación de colector, este transistor constituye la etapa de potencia del transmisor, el cuál funciona en clase C. El circuito de la última etapa con transistor en clase C se puede ver en la figura siguiente:

**Fig. N° 6-4**

donde es:

$V_m(t)$ = Señal de modulación

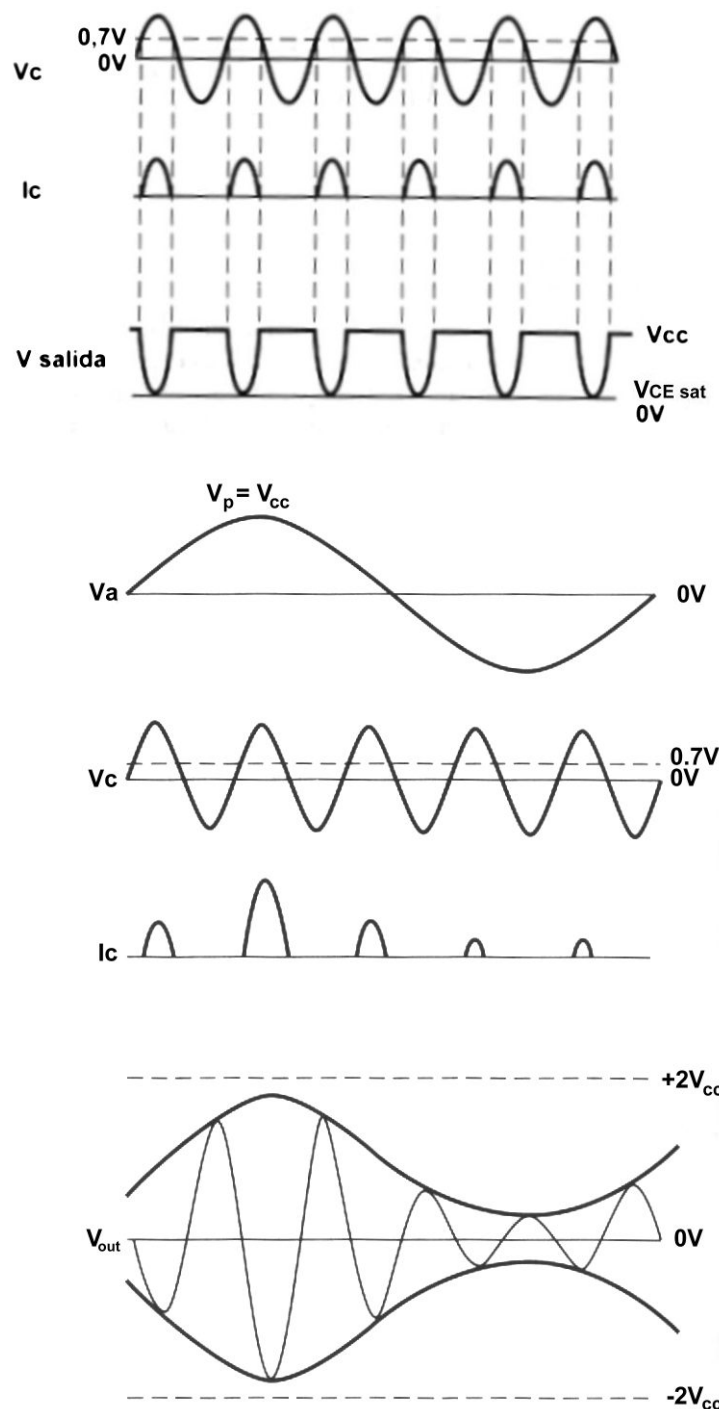
V_{cc} = Tensión de alimentación

$L1 - L2$ = Transformador adaptador de impedancia de la Z de salida del transistor a la impedancia de la antena, generalmente 50Ω .

Funcionamiento:

Supongamos que no existe modulación, entonces se alimenta con V_{cc} al colector del transistor, obteniendo una determinada señal de salida. El choque RF CH1 con el capacitor C2 a masa, evita que la RF llegue al circuito de fuente y de modulación, para esto el choque presentará una alta impedancia a la RF y el capacitor será un corto circuito a masa, por lo cual en el punto (a) no debería estar presente ninguna señal de RF. La tensión continua de alimentación y la señal de audio (baja frecuencia) ven al choque como un corto circuito, pasando estas señales a través de él y llegando al colector del transistor.

Cuando la señal de excitación de base de Rf supera la tensión de 0,7V el transistor entra en conducción circulando entonces corriente por el colector, el transistor pasa de corte a saturación según la señal de excitación. La corriente de colector circula durante menos de 180° por cada ciclo de la portadora de entrada, obteniéndose la operación en clase C. Las formas de onda de las señales de entrada y de salida son las siguientes:

**Fig. N° 6 - 5**

La forma de onda de la corriente de colector es similar a la de un rectificador de media onda, cuya frecuencia corresponde con la frecuencia fundamental de la señal de entrada. Si se aplica ahora una señal de modulación al colector, esta estará en serie con la tensión de alimentación V_{cc} , esto provocará que la tensión de alimentación de colector llegará de un máximo de $2 V_{cc}$ hasta $0 V$ (V_{Cesat}). Debido a que el transistor opera en forma no lineal, la señal de colector contendrá las dos frecuencias de entrada y sus componentes suma y diferencia.

Cuando no hay modulación ($V_m(t) = 0$), se obtiene en la salida una señal de RF que es la portadora, llamada $F(t)$, donde será $F(t) = V_c \cos \omega_c t$ esta es la señal de salida permanente que entrega a la carga el transmisor cuando no hay modulación. La portadora es una señal de amplitud constante y alta frecuencia, espectralmente se representa por un vector. La amplitud de esta portadora es V_c (valor pico), este es directamente proporcional al valor de la fuente de alimentación V_{cc} , esto es:

$$V_c = k V_{cc}$$

V_c = amplitud de la señal de salida

k = constante

V_{cc} = tensión de alimentación

Por lo tanto será $F(t) = kV_{cc} \cos \omega_c t$. Cuando se aplica modulación, la tensión en (a) que es la misma que en (b) y variará según la señal modulante, llegando idealmente a tomar los valores $2 V_{cc}$ y $0V$, para que esto se cumpla el valor pico de la señal modulante deberá ser igual a V_{cc} , esto es $V_m = V_{cc}$. En la práctica la tensión de colector mínima, siempre es algo mayor que 0 y la tensión máxima de trabajo de este deberá ser como mínimo mayor a $2 V_{cc}$, esto se debe tener en cuenta cuando se selecciona el transistor.

Si se cumple lo antes enunciado será: $F(t) = k [V_{cc} + V_m(t)] \cos \omega_c t$

reemplazando $V_m(t)$ será: $F(t) = k (V_{cc} + V_m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t$

Esta es la señal de salida del amplificador cuando existe modulación. Si se saca a V_{cc} factor común quedará:

$$F(t) = kV_{cc} [1 + (V_m/V_{cc}) \cos \omega_m t] \cos \omega_c t$$

donde se denomina a $V_m/V_{cc} = m_a$ es el índice de modulación de la señal de AM

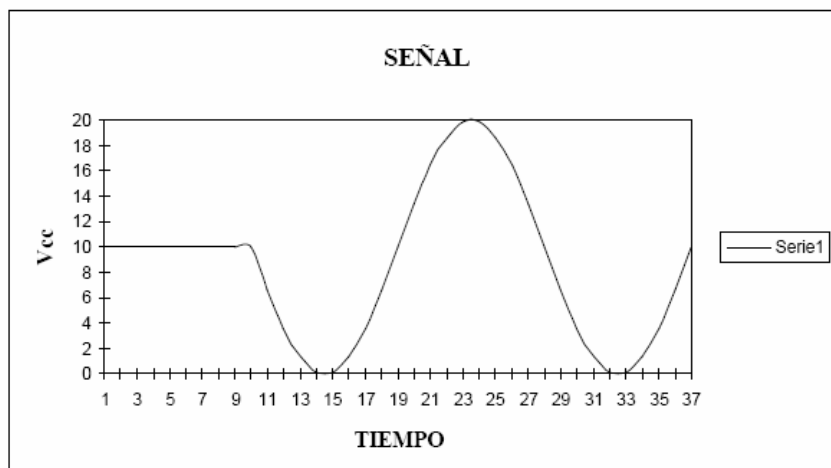
El índice de modulación m_a puede tomar los siguientes valores:

$$m = 1 \quad \text{sí} \quad V_m = V_{cc} \text{ (es inalcanzable)}$$

$$m > 1 \quad \text{sí} \quad V_m > V_{cc}$$

$$m < 1 \quad \text{sí} \quad V_m < V_{cc} \text{ (es lo normal)}$$

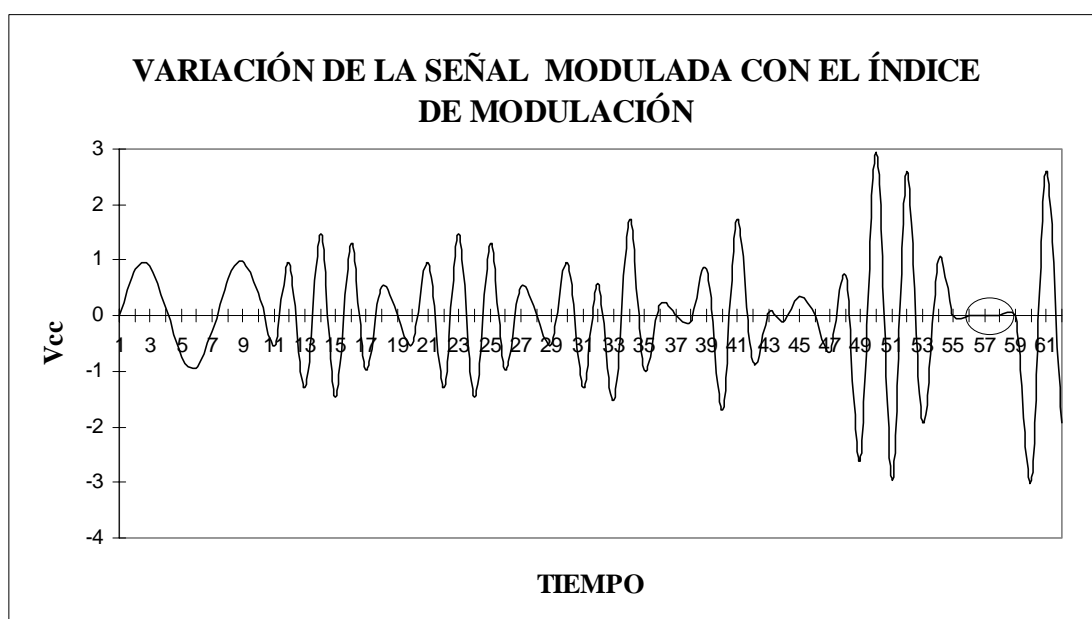
La variación de la tensión de colector según la señal de modulación se puede ver en la figura, donde por simplicidad se tomo $V_{cc} = 10V$ y en el valle de modulación se considera que llega a **0**, esto se puede ver en la figura siguiente:

**Fig. N° 6-6**

En la expresión de $F(t)$ se denomina envolvente a:

$$A(t) = kV_{cc} [1 + (V_m / V_{cc}) \cos \omega_m t]$$

donde $\cos \omega_c t$ es la frecuencia de la portadora de salida. La gráfica de la señal de salida con modulación para distintos índices de modulación se puede ver en la figura siguiente:

**Fig. N° 6-7**

En esta gráfica hasta el punto 9 la señal no presenta modulación ($m_a = 0$). De 9 a 29 aproximadamente la señal está modulada con un índice $m_a < 1$, como se ve la onda nunca llega a cero. De 29 a 47 aproximadamente, la señal en el valle llega a cero, en este caso el índice de modulación es $m_a = 1$. De 47 a 61 la señal presenta una zona donde se hace cero (de 56 a 59) lo que corresponde con un índice de modulación mayor que 1 ($m_a > 1$), puede notarse que cuando el índice de modulación es mayor a uno, la tensión de colector se hace cero en el valle de modulación, ver círculo. No es conveniente utilizar un índice de modulación mayor que 1 ($m_a >$

1) debido a que se pierde parte de la información en la señal de salida, distorsionándose la señal que se recibirá en los receptores.

Lo usual es modular del 70 al 80 %, por norma en la medición de los transmisores y receptores se utiliza como índice de modulación normalizado el 60%.

si se trabaja con la expresión $F(t) = kV_{cc} [1 + (V_m/V_{cc}) \cos \omega_m t] \cos \omega_c t$
se obtiene luego de algunos reemplazos: $F(t) = V_c \cos \omega_c t + V_c m_a \cos \omega_m t \cos \omega_c t$

haciendo el producto de los cosenos obtenemos que:

$$F(t) = V_c \cos \omega_c t + m_a(V_c/2) \cos (\omega_c t + \omega_m t) + m_a (V_c/2) \cos (\omega_c t - \omega_m t)$$

donde:

$V_c \cos \omega_c t$	es la portadora de RF
$(V_c/2) m_a \cos (\omega_c t + \omega_m t)$	es la banda lateral superior
$(V_c/2) m_a \cos (\omega_c t - \omega_m t)$	es la banda lateral inferior

Es decir que la señal de salida está compuesta por tres términos o componentes, una portadora y dos bandas laterales. Se debe notar que la portadora es la misma exista o no modulación y que su amplitud no varía, esto significa que la portadora en un sistema de modulación en amplitud no lleva información alguna, **No Varía su Amplitud**, la amplitud que varía es la de la señal de salida.

Si $m_a = 1$ (índice de modulación igual a 1), la amplitud de cada una de las bandas es la mitad de la portadora, $V_c/2$, esto se ve en la siguiente figura:

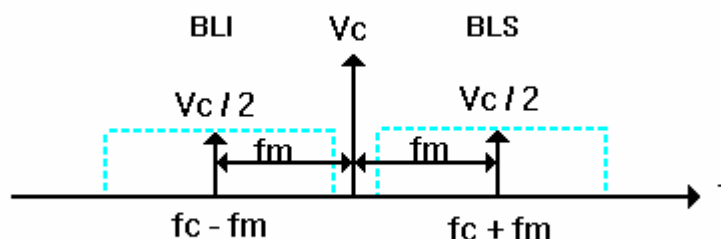


Fig. N° 6-8

Cuando se modula con un determinado ancho de banda de audio se obtiene una banda de frecuencia que constituyen las bandas laterales, ver figura anterior, el ancho de banda de salida de la señal de AM será el ocupado por las dos bandas laterales, esto significa que si el ancho de banda de la señal modulante es de 3 KHz., el ancho de banda de la señal de RF, esto es el espacio que ocupa la señal en el espectro es el doble o sea 6 KHz., que corresponde o conforma el ancho de banda de salida, en definitiva el ancho de banda de una señal modulada en amplitud es dos veces la máxima frecuencia de modulación, en el caso de telefonía la máxima frecuencia de modulación es de 3 KHz y en telefonía de calidad es de 3,4 KHz entonces si es $f_m = 3$ KHz el ancho de banda de la señal de salida es de 6 KHz, en broadcasting la $f_{max} = 5$ KHz por lo tanto el ancho de banda es de 10 KHz (es el ancho de banda de los receptores).

Resumiendo, la característica fundamental de un sistema modulado en amplitud es que con la modulación varía la amplitud de la señal de salida, siendo las amplitudes de la portadora y de las bandas laterales constante. Sin embargo los vectores de las bandas laterales y de la portadora están girando con distintas velocidades, por lo cual varían las posiciones

angulares de cada uno de los vectores, sus composiciones en el tiempo originan la señal de salida de amplitud variable.

La forma de onda se obtiene del análisis fasorial para una señal modulante de frecuencia única, se produce entonces una envolvente de AM a partir de la suma del vector que representa la portadora con los vectores que representan las bandas laterales. Los fasores portadora y frecuencias laterales superior e inferior, giran en dirección contraria a las agujas del reloj y con velocidades angulares diferentes, el versor que representa a la frecuencia lateral superior gira más rápido que el versor portadora ($\omega_u > \omega_c$) y la frecuencia lateral inferior gira más lentamente. En consecuencia si se considera que el fasor portadora se mantiene estacionario, el fasor correspondiente a la frecuencia superior girará en sentido contrario a las agujas del reloj, mientras que el fasor correspondiente a la frecuencia lateral inferior girará en el sentido de las agujas del reloj, el resultado se puede ver en la gráfica siguiente:

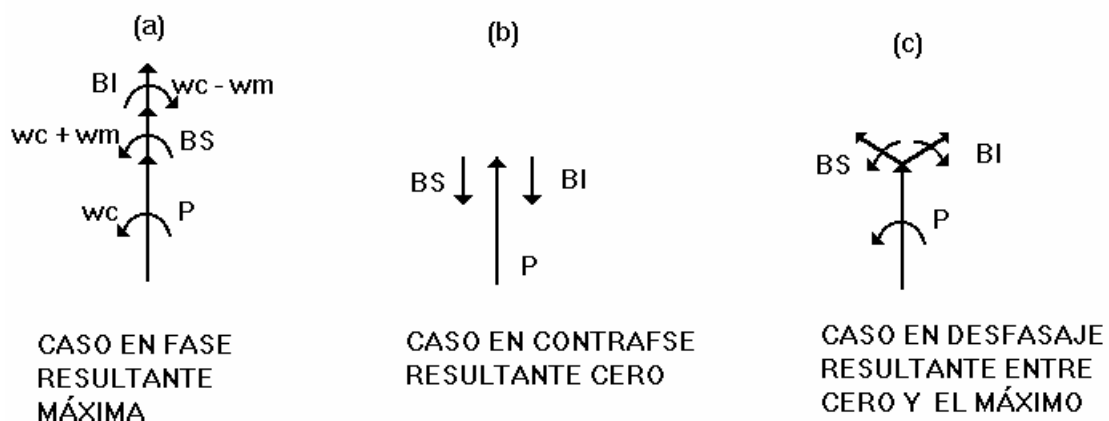


Fig. N° 6-9

Si las posiciones angulares vistas anteriormente las aplicamos a la señal de AM modulada se obtiene:

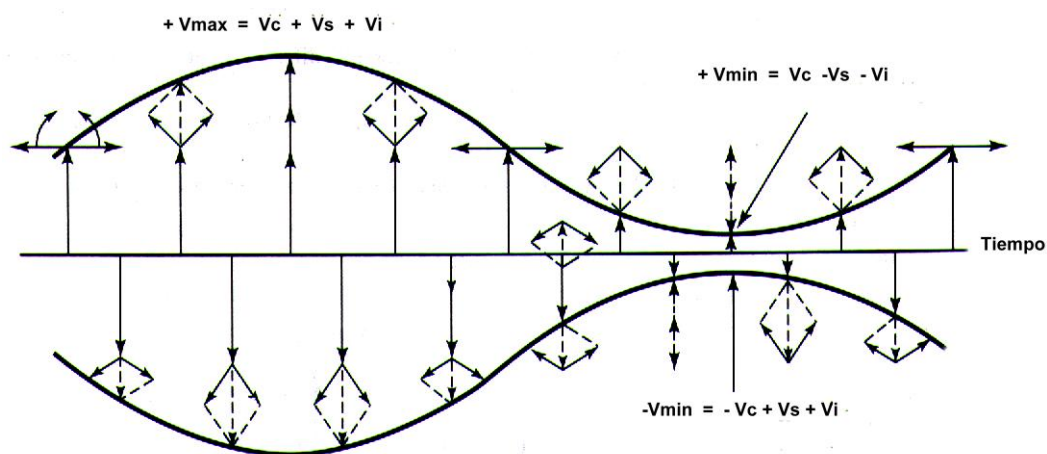


Fig. N° 6- 10

En los sistemas de AM la información está contenida en la envolvente, al desarrollar $F(t)$ esta queda expresada como: $F(t) = \text{portadora} + \text{banda lateral superior} + \text{banda lateral inferior}$, la información realmente es transportada por las bandas laterales. Las dos bandas laterales llevan exactamente la misma información, esto significa que se invierte un gran

porcentaje de potencia en transmitir la portadora que no lleva información. Además se gasta potencia en transmitir en una banda lateral que lleva la misma información que la otra, este último concepto es el que da origen a los sistemas de transmisión en BLU (Banda Lateral Única), cuyas ventajas principales son:

- 1 - Se utiliza menor cantidad de energía para transmitir la información.
- 2 - Se aumenta al doble la capacidad de usufructo del espectro radioelectrico, por ejemplo para una señal de AM y modulando con telefonía, el ancho de banda del canal de RF es de 6 KHz, en las mismas condiciones pero modulando en BLU el ancho de banda del canal de RF es de 3 KHz. Los sistemas de transmisión en BLU generaron la eliminación de la modulación en amplitud en casi todas las comunicaciones de telefonía.
- 3 - La recuperación de la información en los sistemas de AM, es más simple que en los de BLU debido a la presencia de la portadora, esta portadora es necesaria para recuperar fácilmente la información (detector diódico). La demodulación en un receptor de BLU es mucho más sofisticada y cara que en AM.
- 4 - El uso de AM es masivo debido a la buena calidad y bajo costo de recepción o recuperación de la información.

Indice de Modulación

El índice de modulación describe la cantidad de cambio en la amplitud de la señal provocado por la modulante, matemáticamente el índice de modulación m se puede expresar por:

$$m = E_m / E_c$$

donde m = coeficiente de modulación
 E_m = valor pico del cambio en la amplitud del voltaje de la forma de onda de salida.
 E_c = valor pico del voltaje de salida de la portadora sin modular

De igual forma se puede expresar el porcentaje de modulación como el índice de modulación por 100, esto es:

$$M = (E_m / E_c) \times 100$$

Las relaciones de m , E_m y E_c se pueden ver en la gráfica siguiente:

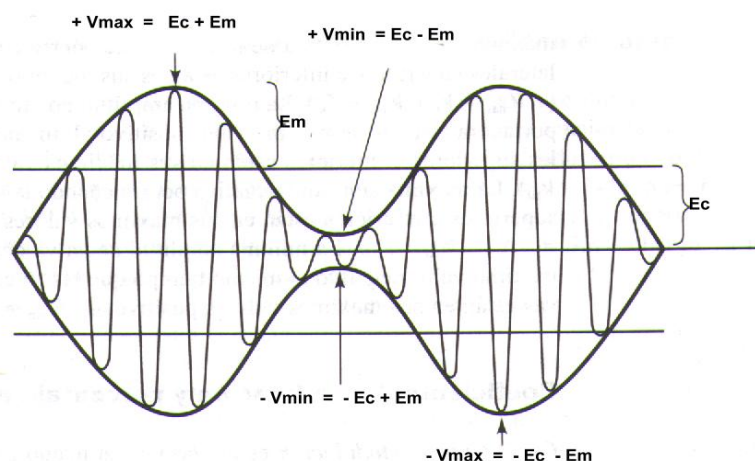


Fig. N° 6 - 11

Si se modula con una única frecuencia y el proceso de modulación es simétrico, las excursiones positivas y negativas de la amplitud de la envolvente son iguales, entonces el porcentaje de modulación se puede expresar como sigue:

$$E_m = \frac{1}{2} (V_{\max} - V_{\min})$$

y
$$E_c = \frac{1}{2} (V_{\max} + V_{\min})$$

por lo que

$$M = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{(V_{\max} + V_{\min})} \times 100$$

Análisis de distribución de potencia

Siempre la tensión de salida se aplica a una determinada resistencia de carga (antena), el valor de esta resistencia de carga para la mayoría de los sistemas de comunicaciones, es de **50Ω**, este es un valor normalizado y es la resistencia de irradiación de la antena. A esta resistencia de carga es a la que se le aplica la potencia de salida.

En cualquier circuito eléctrico, la potencia disipada es igual al voltaje al cuadrado dividido la resistencia de carga, esto significa que la potencia que desarrolla una portadora sin modular aplicada a una resistencia de carga es:

$$P_c = P_p = \frac{(0.707V_c)^2}{R} = \frac{(V_c)^2}{2R}$$

Donde será :
 P_c = potencia de la portadora (watts) efec
 V_c = voltaje pico de la portadora (volts)
 R = resistencia de carga (ohms)

Si se modula con un índice igual a 1, la tensión de la señal de salida total será:

$$V = V_c + 0,5 V_c + 0,5 V_c = 2 V_c$$

la potencia de modulación en el pico es: $4 V_c^2 / 2R = 4 P_p$

Cuando se modula al 100 %, en el pico de modulación la potencia de salida es 4 veces mayor que la potencia de portadora sin modular. La potencia pico de cada banda lateral es:

$$P_{BI} = P_{BS} = V_c^2 / 4 R = P_p / 4$$

Si no se modula al 100% la potencia de las bandas laterales se verá afectada por el índice de modulación **m** obteniéndose:

$$P_{bls} = P_{bli} = \frac{(mV_c / 2)^2}{2R} = \frac{m^2 P_c}{4}$$

Donde $m V_c / 2$ es el voltaje pico de las bandas laterales superior e inferior. En la ecuación anterior se puede ver que si **m = 0** no existirá potencia en ninguna de las bandas

$$P_t = P_c + P_{bls} + P_{bli} = P_c + \frac{m^2 P_c}{4} + \frac{m^2 P_c}{4}$$

laterales. La potencia total con modulación, será la suma de la potencia de la portadora y de las dos bandas laterales, esto es:

$$P_t = P_c + \frac{m^2 P_c}{2} = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$$

De las ecuaciones anteriores se puede ver que la potencia de la portadora no se ve afectada por el proceso de modulación, la potencia total de salida de la onda de **AM** es la suma de las potencias de la portadora y bandas laterales, esto significa que la potencia de salida aumenta al aumentar **m**.

Por ejemplo si la potencia de la portadora es de **100 W**, entonces la potencia de cada banda lateral será: $P_{BI} = P_{BS} = 25 \text{ W}$. A simple vista se ve que si en vez de utilizar un transmisor de AM se utiliza uno de BLU (Banda lateral única), con una potencia del orden de 25 W se obtiene el mismo resultado que con el de AM cuya portadora es de 100 W.

En AM cuando no hay modulación, la tensión aplicada al colector del transistor es V_{cc} , la potencia de entrada en este caso es la que entrega la fuente de alimentación. Cuando se modula la fuente de alimentación siempre sigue entregando la potencia de entrada, la potencia adicional para las bandas laterales deberá ser entregada por el modulador. El modulador empleado en el ejemplo deberá ser capaz de entregar una potencia igual a la mitad de la potencia de la portadora, esto es 50 W.

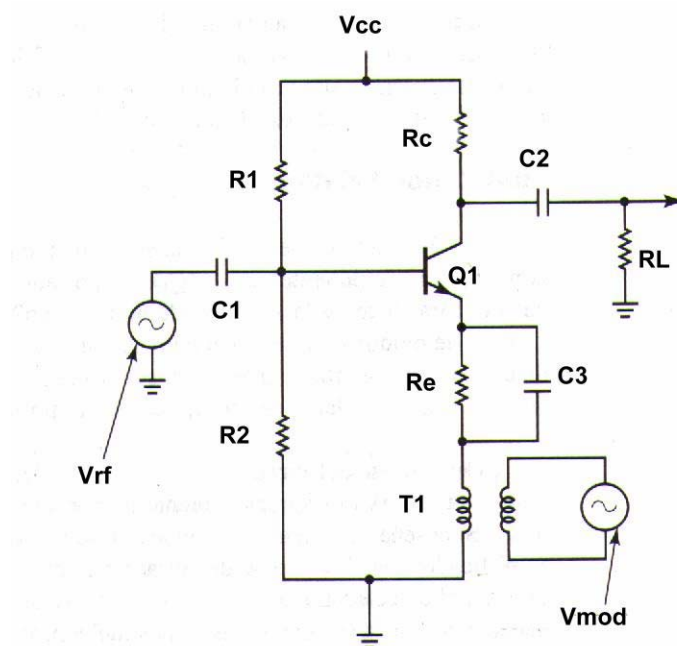
Siempre en transmisores de AM el modulador es un amplificador de audio frecuencias que debe entregar la mitad de potencia de salida de la portadora.

Con modulación senoidal la potencia de salida de la señal modulada promediada se estima en aproximadamente 1,5 veces la potencia de la portadora sin modular, este 50% adicional se debe a la potencia de las bandas laterales y es suministrada por el modulador. Si en lugar de utilizar modulación senoidal se modula con una señal de telefonía, la cresta de modulación será la misma, pero la potencia media para el mismo índice de modulación es menor, llegando a ser la potencia de salida aproximadamente el 50% de la que corresponde a modulación senoidal.

Cuando se modula con una señal mas compleja, como por ejemplo telefonía, la señal de salida presentará un par de bandas laterales por cada frecuencia de modulación, siendo la amplitud de estas bandas laterales dependiente de la amplitud de cada componente.

Modulación de AM de bajo nivel

La modulación en amplitud se puede realizar en distintas partes del transmisor, cuando esta ocurre en el electrodo de salida de la etapa de salida (Colector si es un transistor o Placa si es una válvula) a esta modulación se la denomina **Modulación de Alto Nivel**, cuando la modulación ocurre en algún electrodo anterior al electrodo de salida, a la modulación se la denomina **Modulación de bajo nivel**. Una ventaja que presentan los moduladores de bajo nivel radica en que no requieren del uso de un amplificador de modulación que suministre el 50% de la potencia de la portadora, esto último en el caso de transmisores de mucha potencia es muy importante, una desventaja importante radica en que cuando se desea amplificar a posterior, se deben utilizar amplificadores lineales, los que presentan una baja eficiencia. Un amplificador modulado en AM de bajo nivel que utiliza un transistor, se puede ver en la siguiente gráfica:

**Fig. N° 6 - 12**

En este circuito la señal de R_f se aplica a la base del transistor y la señal modulante se aplica al emisor del transistor, por lo que a este se lo denomina **Modulación de Emisor**. El transistor en este caso debe ser polarizado para operar en clase A con el punto Q centrado. Si no se aplica señal de modulación, el amplificador opera como un amplificador lineal.

Amplificador valvular modulado en placa

Las etapas de potencia de radio frecuencia de los transmisores de AM que utilizan válvulas de vacío, se configuran para operar en clase C, estos amplificadores presentan la gran ventaja de la alta eficiencia que se puede obtener. La modulación en estos se le puede inyectar a cualquiera de los electrodos de la válvula, obteniéndose distintas características en la señal de salida y en los rendimientos que se pueden obtener. Una alternativa de modulación muy utilizada por su rendimiento es la **Modulación en Placa**, esta se ve en la gráfica siguiente:

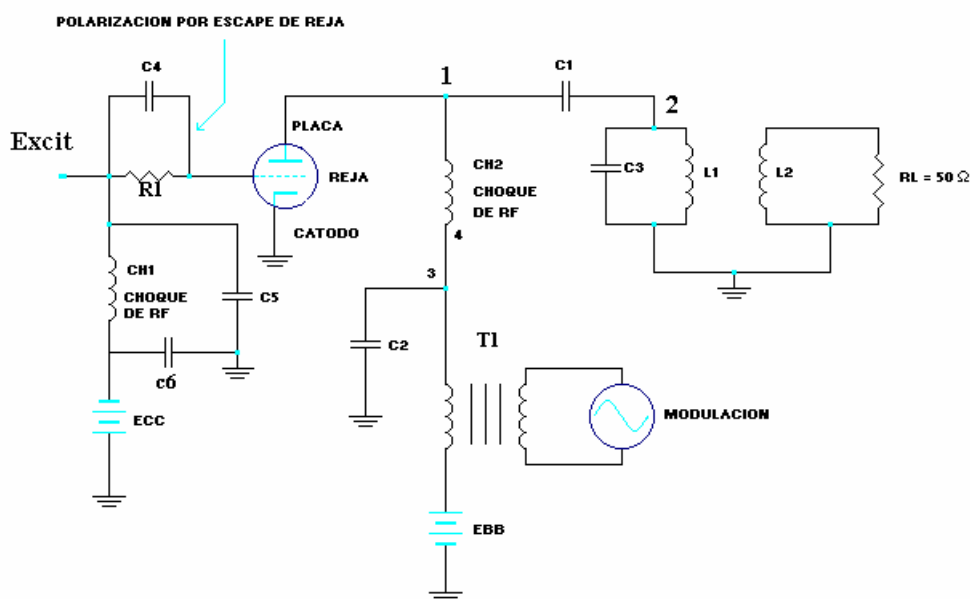


Fig. N° 6-13

Siempre se utilizan 2 fuentes de alimentación, una para polarizar la placa positiva, E_{bb} , y la otra para polarizar la reja control negativa, E_{cc} . El circuito de modulación dispone de un transformador que permite adaptar impedancias entre la de salida del amplificador de audio (modulador) y la impedancia que presentará en el primario de este transformador el circuito de salida de la válvula. El circuito resonante de salida tiene como función adaptar impedancia, de la carga a la impedancia de salida de la válvula. C_1 desacopla la corriente de continua, y C_2 provoca que el punto 3, para la RF, esté a tierra, evitando de esta forma que la RF llegue al transformador de modulación, esto es facilitado también por la alta impedancia que presenta el choque de RF colocado. C_2 se supone que actúa como un corto circuito para la RF y presenta gran impedancia para el audio, mientras que el choque presenta baja impedancia para el audio y alta para la RF.

El nivel de la tensión de excitación E_{exit} es tal que la reja se hace positiva respecto del cátodo en una parte del ciclo, a la reja se la polariza con una tensión negativa, por lo que no toma corriente, pero en realidad en los amplificadores clase C (de potencia) a los que se polariza con esa tensión negativa, la tensión alterna de excitación es tal que hace a la reja positiva en una pequeña porción del pico de señal de excitación y en ese momento hay circulación de corriente de reja.

La porción del ciclo en que se hace la reja positiva es pequeña, por lo que la potencia que esta va a disipar es pequeña. El hecho de que la reja tome corriente, aunque sea pequeña, se debe a que cuando la reja es positiva la placa está al menor potencial posible, próximo a cero, entonces la gran cantidad de electrones que entrega el cátodo tenderán a dirigirse a la reja en lugar de la placa, por estar la reja más próxima físicamente que la placa y tener un potencial comparable. En consecuencia, cuando se tiene la menor tensión positiva en la placa se produce la menor atracción de electrones por parte de esta y si justo en ese momento existe un potencial positivo en la reja, todo los electrones en juego tenderán a desplazarse a la reja, creciendo como se mencionó la corriente en este electrodo y su potencia de disipación. Esto último se debe tener en cuenta para evitar que la potencia de disipación de reja no supere los valores máximos permitidos.

Cuando existe modulación la tensión de placa variará según la tensión de alimentación E_{bb} y tensión de modulación, como se ve en la siguiente figura:

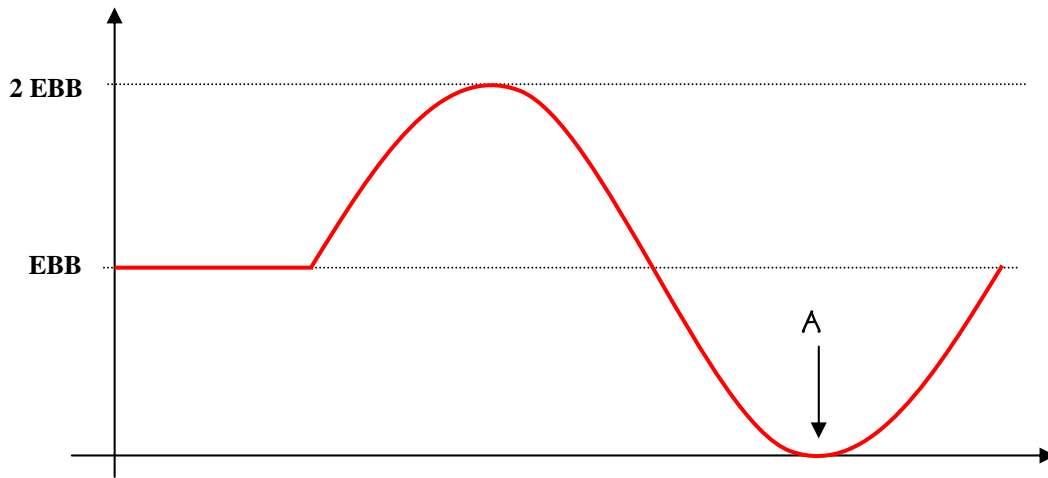


Fig. N° 6-14

La tensión resultado nunca debe ser igual a cero, como se ve en el punto “A” de la gráfica, debido a que siempre se debe mantener en placa una $E_{bbmín}$ (tensión mínima de placa positiva). Si la tensión resultado se hiciera cero, la corriente de rejilla crecería de los valores recomendados, por ser en ese momento el potencial de rejilla positivo, por eso se debe hacer que $E_{bbmín}$ sea algo mayor (más positiva) que la tensión $E_{Gmáx}$ (E_G es tensión de rejilla) disponible, no obstante una cierta cantidad de electrones son capturados por la rejilla constituyendo la corriente de rejilla, una gran cantidad pasarán hacia la placa. Esto último $E_{bbmín} > E_{Gmáx}$ establece una condición de funcionamiento para el amplificador clase C.

Al variar la tensión de placa según se ve en la fig. 6-14, la tensión de RF en la placa variará como se indica en la figura siguiente:

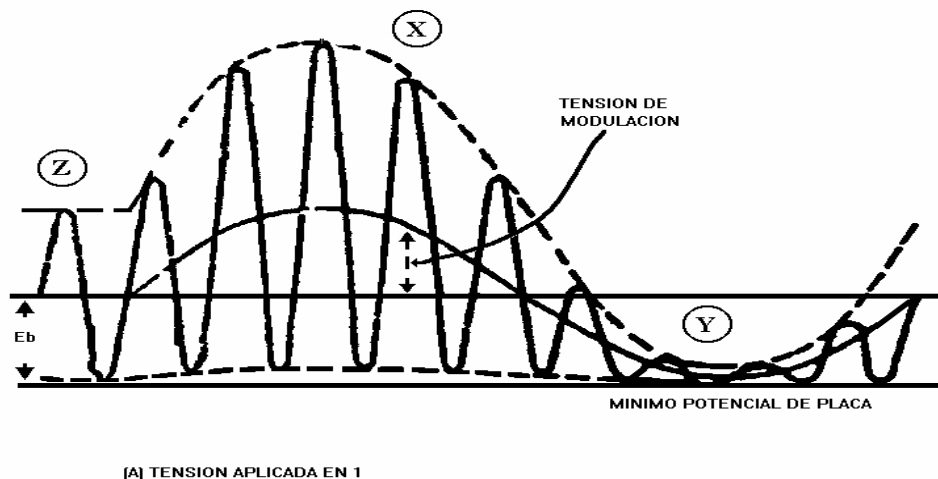
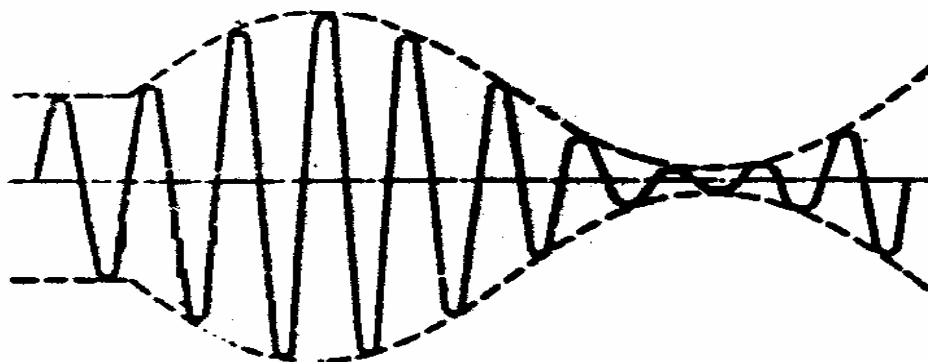
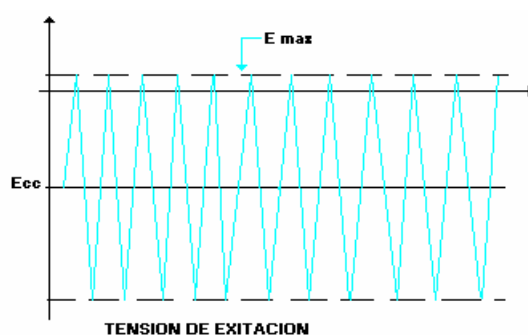
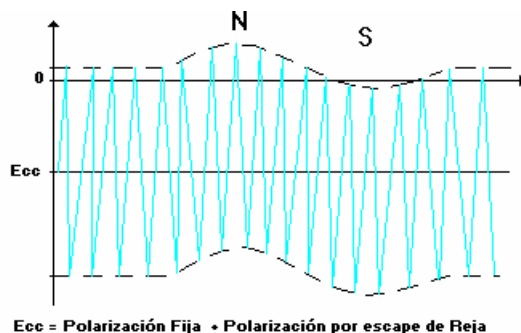


Fig. N° 6-15



(b) TENSIÓN APLICADA EN 2

Fig. N° 6-16Fig. N° 6-17

Ecc = Polarización Fija • Polarización por escape de Reja

Fig. N° 6-18

La tensión de RF cuando no hay modulación es aproximadamente el doble de la E_{bb} (pico positivo) y llega a $E_{bb\text{mín}}$ (pico negativo). En el pico de modulación de RF llega a $4 E_{bb}$. Esto surge debido a que se tiene una tensión continua, mas la señal de audio y superpuesta la señal de radiofrecuencia, como se vio en la figura N° 6-14.

Al diseñar el amplificador clase C, se debe tener en cuenta que de no existir modulación, el nivel de la señal de excitación (potencia de excitación), debe ser tal que de acuerdo con la ganancia del amplificador, la señal de RF llegue hasta $2 E_{bb}$ (punto Z en la figura N° 6-15), a fin de lograr el mayor aprovechamiento de la válvula, se debe mantener como mínimo este nivel de excitación.

Si no se cumple lo antes dicho, cuando se modula al amplificador, el punto x no podrá llegar a ser el doble ($V_{RF} = 2 E_{bb}$), donde ésta E_{bb} incluye la modulación, debido a que la excitación no es suficiente. En definitiva en un amplificador clase C modulado en placa, la potencia de excitación debe de ser tal que el amplificador esté ligeramente saturado en el pico de modulación. De esta forma se garantiza que en el pico de modulación se pueda llegar al nivel máximo, obteniéndose una señal $V_{RF} = 4 E_{bb}$. Lo ideal sería llegar con lo justo.

Si se cumple lo anterior, se debe disponer de tanta potencia de excitación como para poder llegar hasta el punto X de la figura N° 6-15, en este caso en el punto Y de la misma figura el amplificador estará sobre-saturado, esto se debe a que en ésta zona el amplificador necesita mucha menor potencia de excitación. En esta situación en la placa de la válvula se tiene la menor tensión y en la reja la mayor tensión, esto hace que la reja tome una corriente excesiva, creciendo la potencia que esta disipa, pudiendo llegar a dañarse, destruyéndose la válvula. Para disminuir éste problema se pueden emplear dos alternativas:

A - utilizar un excitador con una regulación pobre, esto significa que cuando se le quiera extraer más potencia al excitador, este será incapaz de entregarla provocando una disminución de la tensión de salida y cuando se le extraiga menos potencia aumentará la tensión de salida, obteniendo un nivel de excitación variable según la potencia que le exija la válvula. En este caso gráficamente es como si la señal de excitación estuviera ligeramente modulada en amplitud. Esto se puede ver en la gráfica siguiente:

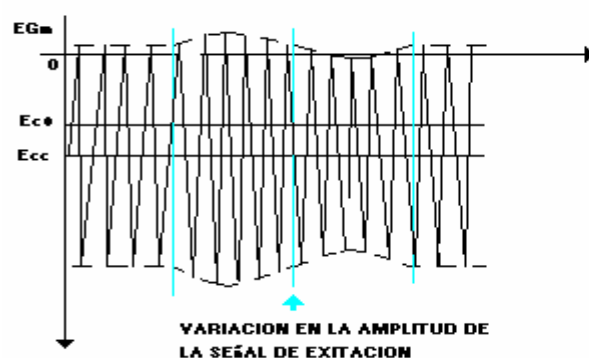


Fig. N° 6-19

E_{cc} es la tensión de polarización, E_{ccorte} es la tensión de corte, E_G es la tensión de reja, esta es ligeramente positiva durante una porción del ciclo de modulación y en ese período circula corriente por la reja, disipándose potencia, simultáneamente en la placa se tiene el pico negativo, debiendo mantenerse la $E_{bbmín} > E_{Gmáx}$. En definitiva al modularse, cuando la tensión de placa crece, disminuye la corriente por la reja, esto disminuye la carga que presenta la entrada de la válvula a la etapa excitadora, al disminuir la carga la tensión de excitación crece. Cuando la tensión de placa disminuye, aumenta la corriente de reja, esto disminuye la impedancia de entrada, por lo que crece la carga que le ofrece la válvula a la etapa excitadora, disminuyendo la tensión de excitación. Es decir, es como si estuviera modulada la tensión de excitación de modo tal que me entrega más cuando es necesario y menos cuando no es necesario, logrando de esta forma no saturar excesivamente en el valle de la modulación.

B - La segunda alternativa es utilizar una combinación de: Polarización fija y Polarización por escape de reja. La polarización fija es provista por E_{cc} . La polarización por escape de reja se obtiene de la corriente que circula por la reja en el intervalo que esta se hace positiva, esto es en el pico positivo de la señal de excitación. Esta corriente de escape de reja circula por el circuito R/C (circuito de polarización de escape por reja), originando una caída de tensión (ver polaridad

en el circuito) que se suma a E_{cc} , aumentando la polarización negativa. En condiciones normales de funcionamiento, sin modulación, la tensión de polarización se conforma por E_{cc} + polarización por escape de rejá, esto se puede ver en la figura N° 6-18.

El circuito de polarización por escape de rejá funciona de la siguiente forma: sin modulación la corriente que toma la rejá genera una tensión de polarización que se suma a la E_{cc} , al aumentar la tensión en placa por efecto de la modulación, disminuye la corriente de rejá, esto provoca una disminución en la caída de tensión en R, se hace menos negativa, disminuyendo la tensión negativa rejá-cátodo, al disminuir esta tensión provoca un aumento de la excitación (zona N). Cuando aumenta la corriente de rejá, aumenta también la caída de tensión en la resistencia R, aumentando la polarización negativa, disminuyendo la excitación (zona S). En conclusión está variando la polarización de la rejá según la señal de modulación, entregando la excitación necesaria en el pico positivo de la modulación que es donde hace falta y evitando sobresaturar mucho en el pico negativo de la modulación, cuando no es necesario tanta excitación.

El capacitor C estabiliza la caída de tensión en la resistencia R, el valor de este capacitor se elige de modo tal que la variación de la tensión siga a la modulación, por lo que su capacidad se determina de tal manera que su reactancia X_c sea aproximadamente mayor o igual que $2R$ para la máxima frecuencia de modulación, si esto se cumple, también se cumple con seguridad para menores frecuencias. El valor de la resistencia R se obtiene de acuerdo a las variaciones de tensión que se necesiten, dependiendo de las corrientes que estén involucradas.

Amplificador clase C modulado en rejá control

En este caso se superpone la modulación con la tensión de polarización de rejá control, la gran ventaja de este tipo de modulación radica en la relativamente baja potencia de modulación y la desventaja radica en el pobre rendimiento que se puede obtener, un circuito básico sería el siguiente:

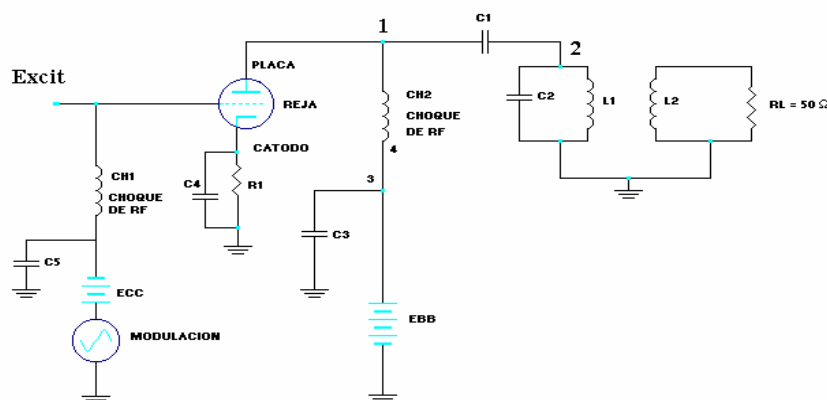


FIG. N° 6-20

El ajuste del amplificador clase C cuando se modula en rejá control, es tal que en el pico positivo del ciclo de modulación, la válvula opera en las condiciones que corresponden con un amplificador clase C típico con un aceptable rendimiento de placa. El nivel de excitación de rejá es menor que el necesario para saturar a la válvula, permitiendo que en el pico de

modulación llegue a estar el amplificador ligeramente saturado, las formas de onda en la reja y en la placa se ven en las siguientes figuras:

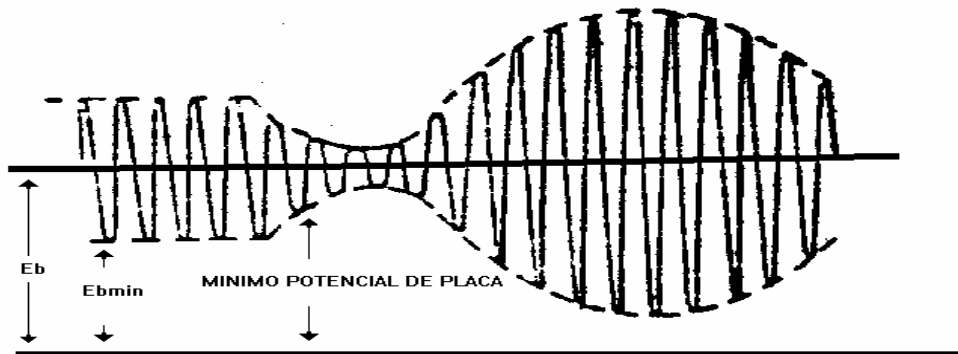


Fig. N° 6-21

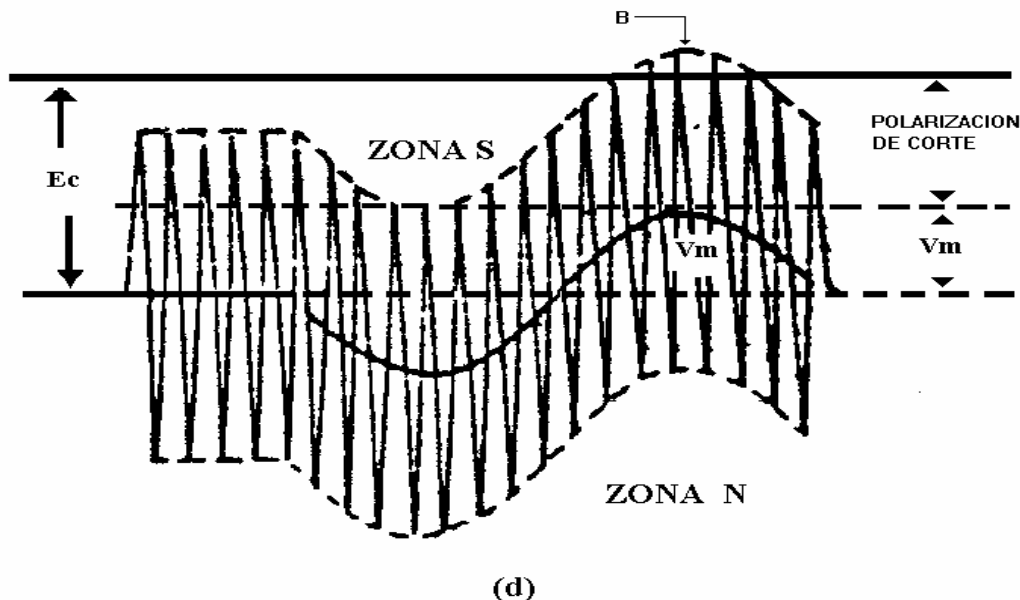


Fig. N° 6-22

El primer paso en el diseño del amplificador clase C modulado en reja, consiste en obtener las condiciones de funcionamiento en la cresta de modulación, esto se debe a que en la cresta de modulación este amplificador se comporta como el amplificador clase C sin modular convencional, ajustándose las tensiones de polarización, nivel de excitación, impedancias de carga, etc. Para obtener el nuevo nivel de polarización de reja se desplaza el nivel anterior de polarización hasta que la señal de salida de la válvula caiga a cero, al modular y en la cresta de modulación, la señal de excitación debe llegar al nivel máximo que corresponde con el amplificador clase C sin modular convencional, punto B en la Fig. N° 6-22. El valor de la tensión de polarización a utilizar será entonces el valor medio entre los valores determinados anteriormente.

El valor pico a pico de la tensión de modulación a utilizar para un 100% de modulación será igual a la diferencia entre el valor de polarización que produce salida cero y el que produce la salida de cresta. Como se ve en la Fig. N° 6-21, cuando no hay modulación la tensión $E_{b_{min}}$ es algo mayor que $\frac{1}{2}$ de E_b , esto significa que la potencia de salida es $\frac{1}{4}$ de la potencia que la misma válvula es capaz de entregar operando como simple amplificadora en clase **C** y la potencia en la cresta de modulación corresponde con la del amplificador clase **C** simple.

Esto último hace que el rendimiento de placa cuando no hay modulación es aproximadamente la mitad del correspondiente a la operación simple en clase **C**, esto se debe a que al no haber modulación el valor de la tensión $E_{b_{min}}$ es grande y la potencia de salida es 4 veces menor, disipando mucha potencia la placa, esto se ve en la Fig. N° 6-21. Además la potencia que disipa la placa es mayor cuando no hay modulación que cuando si existe

Si se compara el amplificador clase **C** modulado en placa con el modulado en reja, se observa que el rendimiento del primero es mucho mayor al igual que la potencia de salida que el segundo, para una misma válvula, pero el segundo requiere una potencia de modulación mucho menor que el primero. La linealidad de la modulación es mayor en un amplificador modulado en placa que en un modulado en reja, esto se debe a la tendencia que existe en la modulación en reja a aplanarse las crestas positivas, debido a la imperfecta regulación en la tensión de excitación de RF. Para mantener una linealidad razonable es conveniente que la tensión de reja no sea llevada a un valor positivo mayor que el estrictamente necesario y se debe tratar de que las tensiones de excitación y de modulación posean la mayor regulación posible.

El uso de este tipo de amplificadores se limita exclusivamente a amplificadores de Televisión, debido a que en estos la modulación se realiza en banda ancha, lo que resultaría en un amplificador modulador muy costoso si se modulara en placa.