

1.- Modulación .....	2
2.- Modulación de Amplitud .....	4
3.- Amplificador Clase “C”, Modulador en Placa, colector o drenaje.....	7
a.- Generalidades .....	7
b.- Esquema de circuito modulador no práctico y espectro de AM.....	8
c.- Representación fasorial de una onda modulada en amplitud .....	9
d.- Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación.....	11
e.- Potencia de la señal modulada .....	15
f.- Esquema de Circuito Modulador en Placa tipo práctico .....	18
g.- Formas de Onda.....	21
h.- Análisis de Modulación (Rectas de Operación Múltiples) .....	22
4.- Transmisores de AM.....	26
a.- Modulador con colector o drenaje acoplado a transformador .....	27
b.- Modulador con colector o drenaje acoplado en serie .....	28
c.- Modulador con polarización de compuerta .....	29
5.- Multiplicadores de frecuencia.....	30

## Bibliografía

- 1) Krauss-Bostian-Raab, 1984, Estado Sólido en Ingeniería de Radiocomunicación, Limusa
- 2) Terman, 1947, Ingeniería Eléctrica y de Radio, Arbó
- 3) RFM-430, 1977, Transistores de Potencia de RF, Arbó
- 4) SP-52, 1975, Circuitos de Potencia de Estado Sólido, Arbo
- 5) Steve C. Cripps, 1999, RF Power Amplifiers for Wireless Communications
- 6) Dpto de Ingeniería de Comunicaciones\_ Universidad de Cantabria

## 1.- Modulación

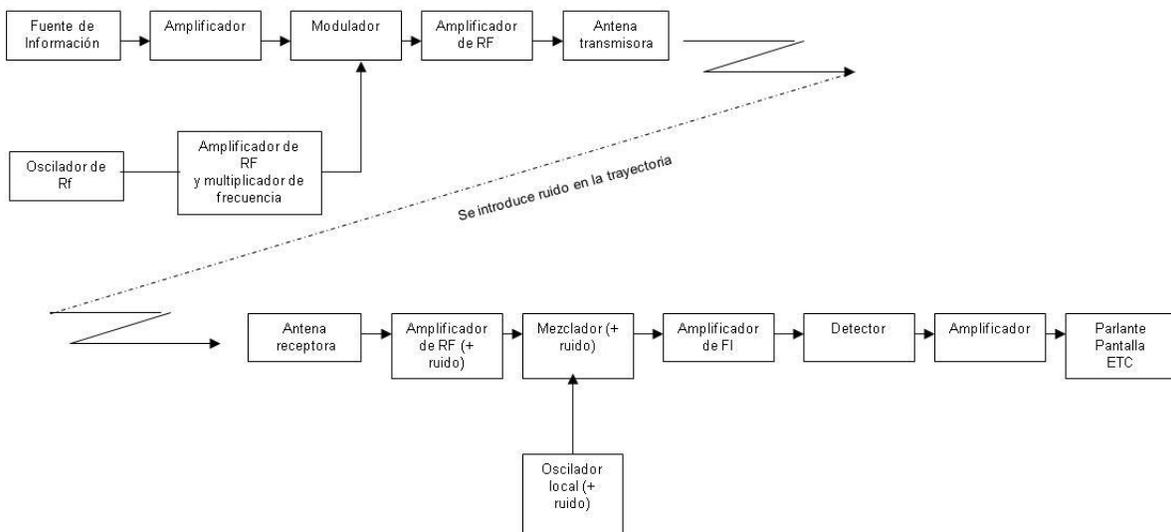
Es el proceso mediante el cual el contenido de una información que puede ser una señal de audio, video o de datos, que consideraremos la señal de banda base, siendo esta señal la que está conformada por los mensajes emitidos y cuya banda ocupada se encuentra comprendida entre la frecuencia “0”, o un valor muy cercano a éste, y una frecuencia máxima “ $f_{max}$ ”, dicha información se transfiere a una portadora de RF antes de transmitirse a otra parte del espectro. A su vez, el proceso inverso, a saber, la recuperación de la información de la señal de RF, se denomina demodulación o detección.

*Según el IEEE, se define la modulación como el proceso por medio del cual se varía alguna característica de una portadora de acuerdo con una señal modulante. La señal de banda base es la onda moduladora y el resultado del proceso de modulación es la onda modulada.*

En sus formas más simples, un modulador puede hacer que alguna característica de la señal de RF varíe en proporción directa a la forma de onda moduladora; ese proceso se llama modulación analógica. Los moduladores más complicados convierten a digital y codifican la señal moduladora antes de la modulación. Para muchas aplicaciones, se prefiere la modulación digital a la analógica.

Un sistema de comunicación completo como el de la siguiente figura

Diagrama en bloques de un Transmisor y Receptor de Radio

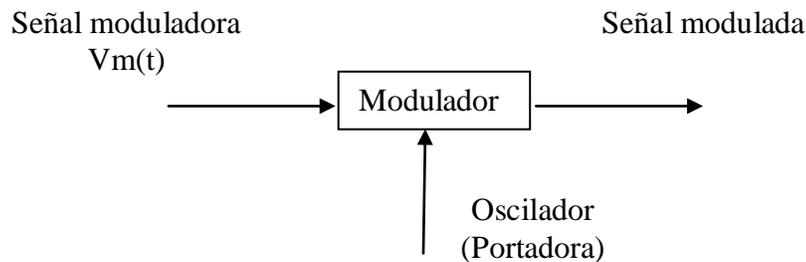


Consta de una fuente de información, un oscilador de RF, un modulador, un amplificador de RF, un canal de RF (que incluye, las antenas, la trayectoria de transmisión, etc ), y varias etapas que constituyen en el ejemplo, un transmisor y un receptor del tipo superheterodino.

El sistema funciona si el usuario de la información la recibe de una fuente confiable. La meta del diseñador es crear un sistema de trabajo de poco costo que cumpla con las restricciones legales referentes a potencia de transmisión, altura de antena y ancho de banda de la señal, por ejemplo.

Como los esquemas de modulación y demodulación difieren en costo, ancho de banda, rechazo de interferencias, consumo de potencia y otros factores, la elección del tipo de modulación es parte importante en el diseño del sistema de comunicación.

Para comprender el proceso de modulación, podemos considerar un modulador como el de la siguiente figura que posee dos entradas y una salida.



En una entrada colocamos una señal moduladora  $v_m(t)$ ; y en la otra conectaremos un oscilador, o sea la portadora, caracterizada por una tensión sinusoidal con amplitud constante y frecuencia  $f_c$ . La salida es la forma de onda modulada

$$F(t) = A(t) \cos[\omega_c t + \mathcal{G}(t)] = A(t) \cos \phi(t)$$

La *amplitud*  $A(t)$  o el *ángulo*  $\phi(t)$ , o ambos, son controlados por  $v_m(t)$ . En *modulación de amplitud* (AM), la envolvente de portadora  $A(t)$  varía mientras  $\phi(t)$ , permanece constante; en modulación de ángulo,  $A(t)$  queda fija y la señal moduladora controla a  $\phi(t)$ . La modulación de ángulo puede efectuarse a través de un *modulador de frecuencia* o *modulador de fase*, dependiendo de la relación entre el ángulo  $\phi(t)$ , y la señal moduladora.

Si bien podemos decir que la señal  $F(t)$  puede llamarse onda cosenoidal modulada, no se trata de una senoide de frecuencia única cuando está presente la modulación. Si  $A(t)$  o  $\phi(t)$ , varía con el tiempo, el espectro de  $F(t)$  ocupará un ancho de banda determinado por la señal moduladora y el tipo de modulación empleado.

## 2.- Modulación de Amplitud

Modulación de amplitud (AM) es el proceso de cambiar la amplitud de una portadora de frecuencia relativamente alta de acuerdo con la amplitud de la señal modulante (información)

Las frecuencias que son lo suficientemente altas para radiarse de manera eficiente por una antena y propagarse por el espacio libre, se llaman comúnmente radiofrecuencias o simplemente RF.

Con la modulación de amplitud, la información se imprime sobre la portadora en la forma de cambios de amplitud.

La modulación de amplitud (AM) en forma de conmutación, es el tipo más antiguo de modulación. Hoy en día la modulación de amplitud se utiliza en aplicaciones audibles analógicas que requieren receptores simples (por ejemplo, la radiodifusión comercial), o que se transmiten por propagación ionosférica y requieren anchos de banda estrechos, como las comunicaciones aeronáuticas transcontinentales.

La banda de radiodifusión comercial AM abarca desde 535 a 1650 kHz.

La radiodifusión comercial de televisión se divide en tres bandas (dos de VHF y una de UHF) Los canales de la banda baja de VHF son entre 2 y 6 (54 a 88 MHz), los canales de banda alta de VHF son entre 7 y 13 (174 a 216 MHz) y los canales de UHF son entre 14 a 83 (470 a 890 MHz).

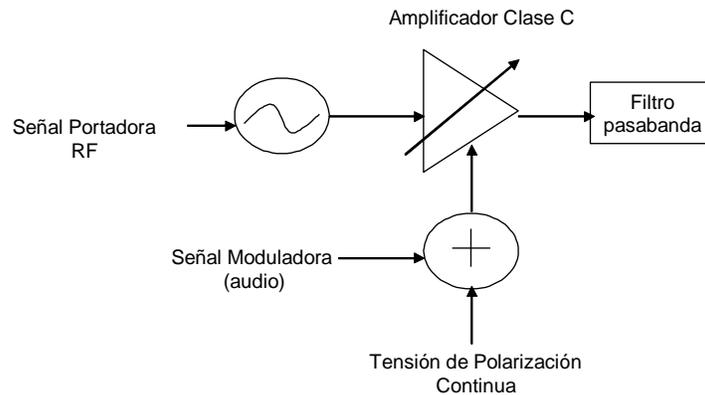
En las comunicaciones de radio móvil de dos sentidos tal como una radio de banda civil (CB) (26.965 a 27.405 MHz) o los aviones con los aeropuertos (118 a 136 Mhz)

Como ya hemos descripto, un modulador de AM es un circuito no lineal con dos señales de entrada:

- a) Una señal portadora de amplitud constante y de frecuencia única
- b) La señal de información. La información "actúa sobre" o "modula" la portadora y puede ser una forma de onda de frecuencia simple o compleja compuesta de muchas frecuencias que fueron originadas de una o más fuentes.

Debido a que la información actúa sobre la portadora, se le llama señal modulante. La resultante se llama onda modulada o señal modulada.

Existen varias formas de AM relacionadas entre sí; difieren en sus métodos de generación y en sus espectros. La forma más sencilla, llamada a menudo AM "directa" se puede generar colocando una **tensión moduladora en serie con la alimentación** de placa, colector o drenaje de un amplificador RF en clase C que se excita hasta la saturación.



Cuando la tensión moduladora es positiva, el amplificador recibe una tensión mayor que la de la placa, o colector o drenaje y consecuentemente entrega una señal de salida más alta; cuando es negativa, la tensión de placa, colector o drenaje y la salida del amplificador son menores que sus valores no modulados. Si la tensión  $F(t)$  de salida del amplificador es linealmente proporcional a la tensión instantánea de placa, colector, o drenaje y la  $F(t)$  se relaciona con la tensión moduladora  $v_m(t) = V_m \text{sen} \omega_m t$ , si llamamos  $V_{cc}$  a la tensión de alimentación de placa, colector o drenaje y  $K$  a una constante de proporcionalidad, los picos negativos de  $v_m(t)$  no deben producir una condición donde el amplificador deje de operar pues esa condición se denomina sobre modulación e introduce distorsión.

Entonces si

$$v_m(t) = \text{sen} \omega_m t$$

$$F(t) = K[V_{cc} + V_m \text{sen} \omega_m t] \text{sen} \omega_c t$$

$$V_c = KV_{cc}$$

$$F(t) = V_c [1 + (V_m / V_{cc}) \text{sen} \omega_m t] \text{sen} \omega_c t$$

Aquí tenemos que  $V_c$  es la tensión de portadora sin modular,  $ma$  el índice de modulación y envolvente se representará como

$$A(t) = V_c [1 + ma \text{sen} \omega_m t]$$

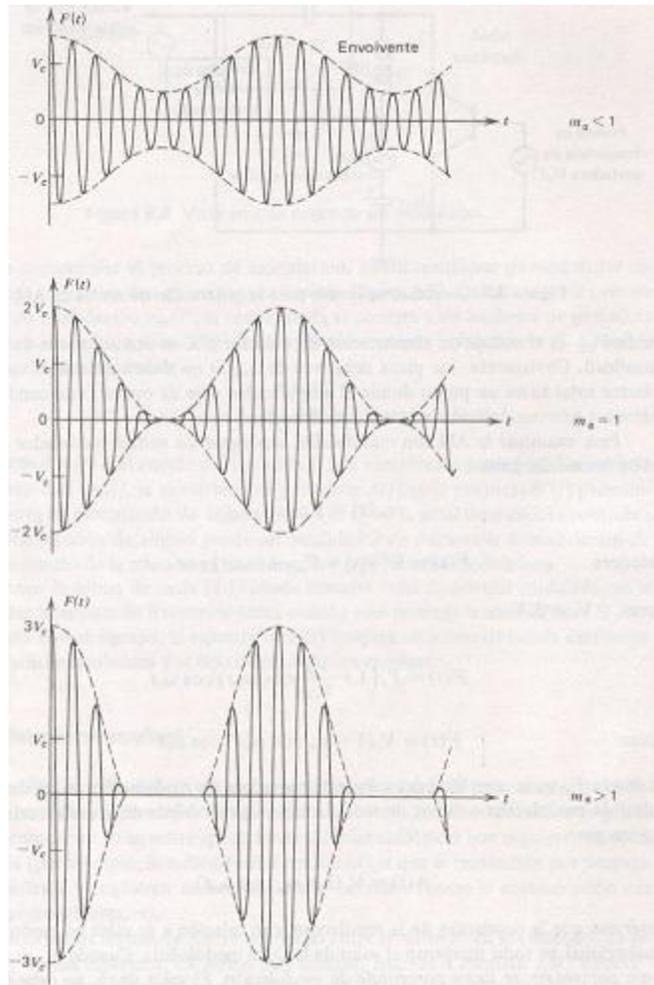
Podemos observar que la desviación de la envolvente, con relación a su valor no modulado, es proporcional en todo momento al valor de la señal moduladora.

Cuando  $ma$  se expresa como porcentaje, se llama porcentaje de modulación. El valor de  $ma$  no debe exceder a la unidad o sea al 100% en los picos negativos, para evitar la distorsión.

Si graficamos  $F(t)$ , podemos observar los valores  $\omega_m$  y  $\omega_c$ , para diferentes valores de  $ma$

Para  $ma < 1$  la amplitud de portadora varía en proporción a  $(1 + ma \text{sen} \omega_m t)$ , y la frecuencia de portadora se puede calcular a partir de los intervalos entre dos cruces por cero sucesivos de  $F(t)$ , donde permanece constante  $f_c$ . Para  $ma > 1$ , la ecuación de  $F(t)$  no es

válida para los tiempos en que  $(1 + ma \sin \omega mt)$  sea menor que cero; cuando esto sucede, la salida del amplificador es cero.



### 3.- Amplificador Clase “C”, Modulado en Placa, colector o drenaje

#### a.- Generalidades

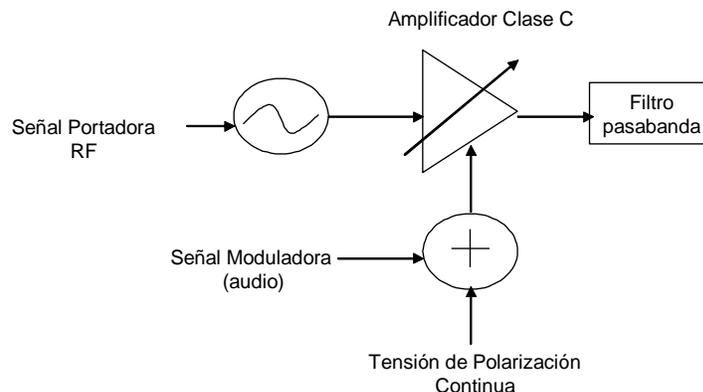
Uno de los inconvenientes de las señales moduladas en amplitud en niveles bajos, es la necesidad de una amplificación lineal, a fin de evitar la distorsión de la señal. En los amplificadores de potencia de un transmisor la exigencia de linealidad va asociada a un bajo rendimiento de potencia, que se hace más crítico si aumenta el índice de modulación. Para mejorar el rendimiento, en los transmisores de alta potencia, se realiza la modulación en la última etapa amplificadora, de forma tal que la potencia de excitación necesaria se obtiene en etapas previas que amplifican la portadora sin modular y la señal de banda base (audio) por separado.

Existen dos formas de controlar la ganancia en amplificadores de potencia, a través de la entrada del elemento activo (base en BJT, gate en FET o grilla en válvulas) o a través de la tensión de polarización en colector, drenaje o placa; en el primer caso la potencia necesaria es mucho menor, pero la linealidad es mala, en cambio en el segundo la linealidad es mucho mejor, aunque trabajemos con índices de modulación altos, pero la potencia necesaria en la banda de audio hace necesario la utilización de amplificadores lineales.

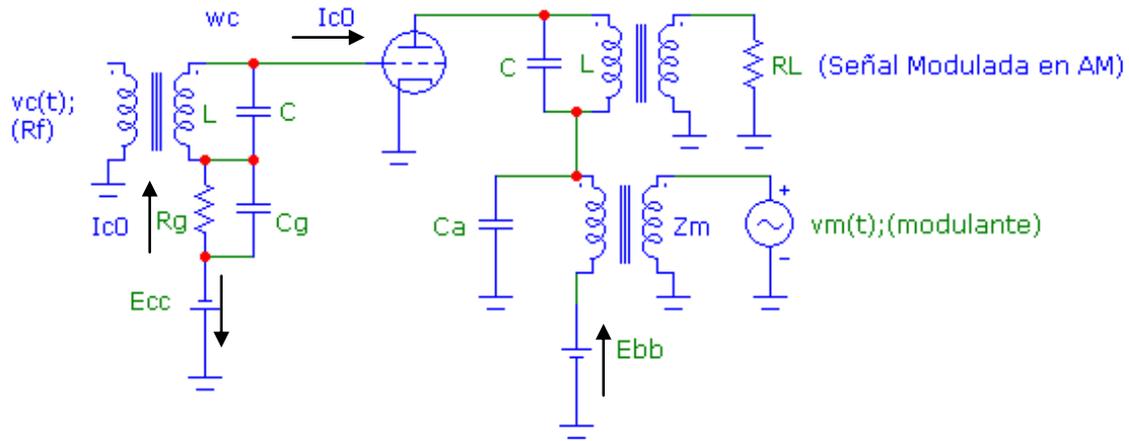
Debido a lo comentado, como ya hemos dicho, el método más utilizado, para modular AM, es esta última opción, o sea la modulación en placa, colector o drenaje.

Entonces, estudiemos la modulación en placa, (sólo a efectos didácticos por su característica, posteriormente la veremos utilizando transistores), con la misma se pretende generar una onda modulada en amplitud, y se basa en que el modulador se comporte como un amplificador de ganancia variable, que depende de la tensión de alimentación, formada por una componente continua a la que se le suma la señal moduladora, similar al modelo enunciado.

Volviendo al esquema que se mostró anteriormente, comparémoslo con un circuito real:



## b.- Esquema de circuito modulador no práctico y espectro de AM



Si utilizamos el circuito esquemático dibujado, que pertenece a un modulador no práctico, con polarización combinada, y suponemos una señal de salida modulada en AM, con un índice de modulación,  $ma = \frac{V_m}{V_c}$ , la señal de salida tendrá la forma,  $v(t) = V_c[1 + m \text{sen} w_m t] \text{sen} w_c t$  donde  $0 \leq m \leq 1$ , “ $V_c$ ” es la amplitud de la portadora. “ $w_c$ ” la pulsación angular de dicha portadora y “ $w_m$ ” la pulsación de la modulante

Si analizamos el espectro de  $v(t) = V_c[1 + m \text{sen} w_m t] \text{sen} w_c t$ , obtenemos

$$v(t) = V_c[1 + m \text{sen} w_m t] \text{sen} w_c t$$

$$v(t) = V_c \cdot \text{sen} w_c t + m \cdot V_c \cdot \text{sen} w_c t \cdot \text{sen} w_m t$$

$$\text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

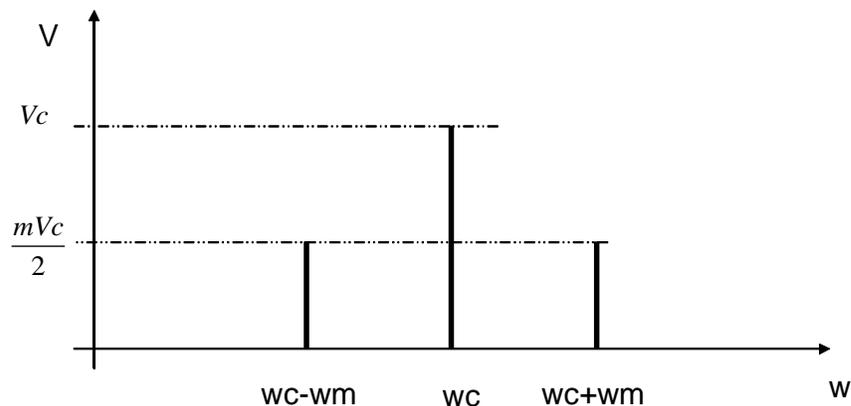
reemplazando obtenemos

$$v(t) = V_c \cdot \text{sen} w_c t + \frac{m \cdot V_c}{2} \cdot \cos(w_c - w_m)t - \frac{m \cdot V_c}{2} \cdot \cos(w_c + w_m)t$$

Si al índice de modulación lo expresamos en porcentaje obtenemos

$$ma = \frac{V_m}{V_c} \quad \text{o} \quad Ma\% = \frac{V_m}{V_c} 100$$

Donde  $Ma\%$ , puede variar de 0 al 100% sin que exista distorsión y podemos dibujar el espectro



### c.- Representación fasorial de una onda modulada en amplitud

Para una señal modulante de frecuencia única, se produce una envolvente de AM a partir del vector suma de la portadora y de las frecuencias laterales superiores e inferiores. Las dos frecuencias laterales se combinan y producen un componente resultante que a su vez se combina con el vector de la portadora. Los fasores para la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores giran en una dirección contraria a las manecillas del reloj.

Sin embargo, la frecuencia lateral superior gira más rápido que la portadora ( $\omega_{usf} > \omega_c$ ) y la frecuencia lateral inferior gira más lenta ( $\omega_{isf} < \omega_c$ ). Consecuentemente, si el fador para la portadora se mantiene estacionario, el fador para la frecuencia lateral superior continuará girando en una dirección contraria a las manecillas del reloj respecto a la portadora, y el fador para la frecuencia lateral inferior girará en la dirección de las manecillas del reloj.

Los fasores para la portadora y las frecuencias superiores e inferiores combinan, a veces en fase (adición) y a veces fuera de fase (sustracción). Se muestra en el siguiente gráfico, que la máxima amplitud positiva de la envolvente ocurre cuando la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores están en sus máximos, valores positivos al mismo tiempo, ( $+ V_{max} = V_c + V_{usf} + V_{isf}$ ).

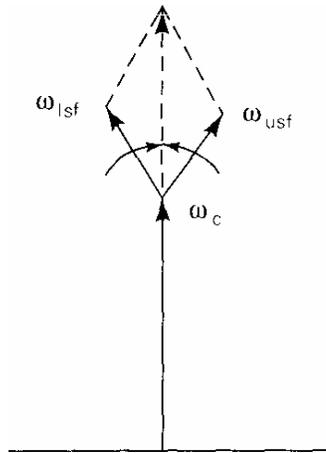
La mínima amplitud positiva de la envolvente ocurre cuando la portadora está en su máximo valor positivo al mismo tiempo que las frecuencias laterales superiores e inferiores estén en sus máximos valores negativos

$$(+ V_{min} = V_c - V_{usf} - V_{isf})$$

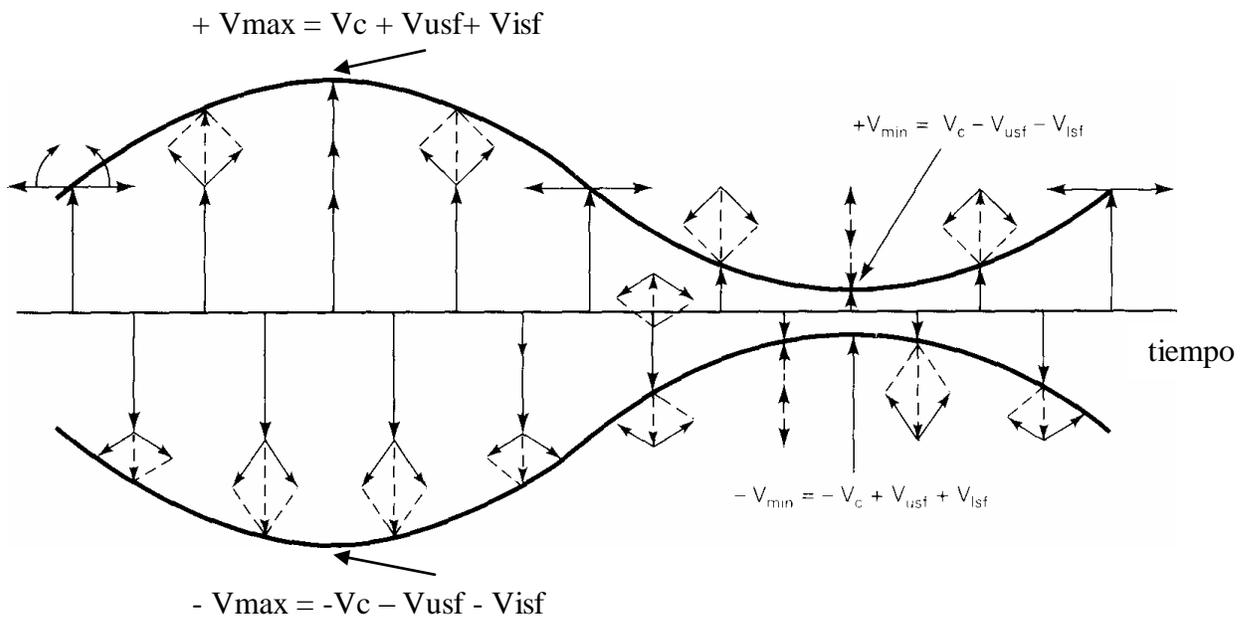
La máxima amplitud negativa ocurre cuando la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores están en sus máximos valores negativos al mismo tiempo

$$(- V_{max} = - V_c - V_{usf} - V_{isf}).$$

## Adición fasorial



$V_{usf}$  = tensión de la frecuencia lateral superior  
 $V_{lsf}$  = tensión de la frecuencia lateral inferior  
 $V_c$  = tensión de la portadora



### d.-Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación

Coeficiente de modulación es un término utilizado para describir la cantidad de cambio de amplitud (modulación), presente en una forma de una onda de AM. El porcentaje de modulación es simplemente el coeficiente de modulación establecido como un porcentaje. Más específico, el porcentaje de modulación proporciona el cambio de porcentaje, en la amplitud de la onda de salida cuando está actuando sobre la portadora por una señal modulante. Matemáticamente, el coeficiente de modulación es

$$m = \frac{Vm}{Vc} = \frac{Em}{Ec}$$

en donde:

$m$  = coeficiente de modulación (sin unidad)

$Vm = Em$  = cambio pico en la amplitud del voltaje de la forma de onda de salida (volts)

$Vc = Ec$  = amplitud pico del voltaje de la portadora no modulada (volts)

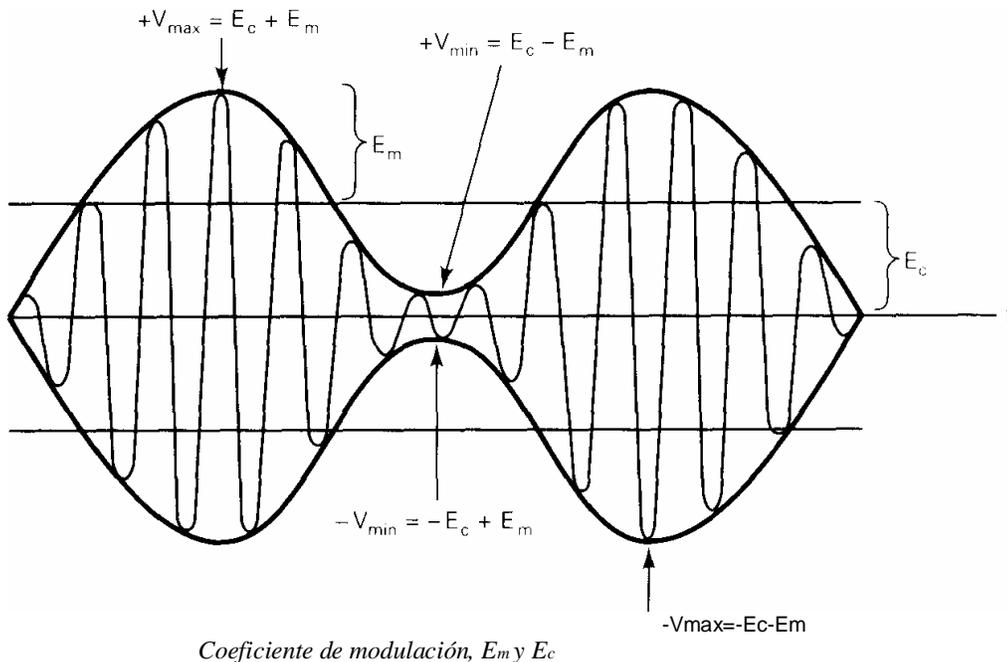
Según lo anterior

$$Vm = m Vc = m Ec$$

$$Vc = \frac{Vm}{m} = \frac{Em}{m}$$

El índice de modulación en porcentaje es:

$$Ma\% = \frac{Vm}{Vc} 100$$

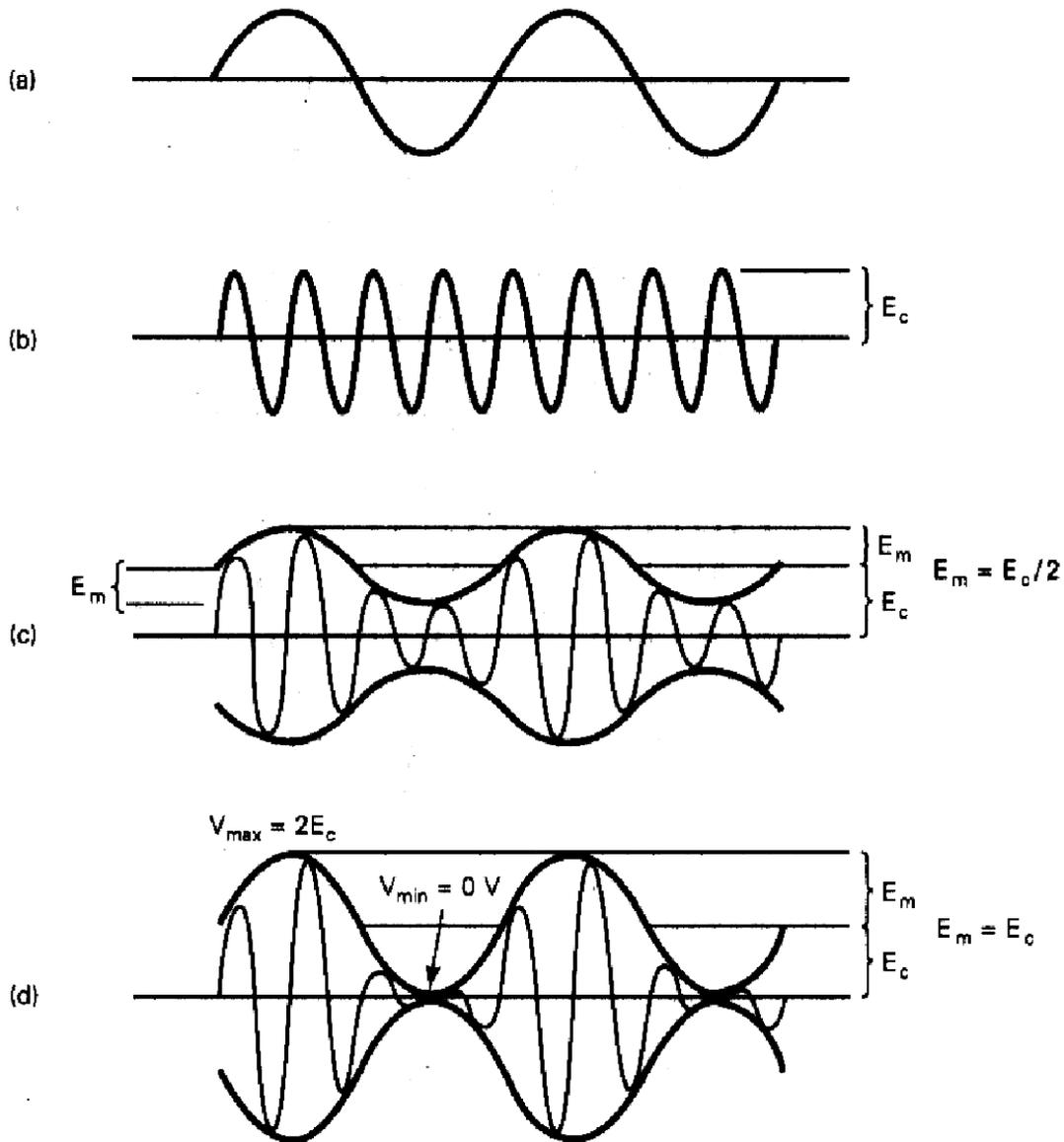


En la figura anterior, la señal modulante es una onda seno pura de frecuencia simple y el proceso de modulación es simétrico (es decir, las excursiones positivas y negativas de la amplitud de la envolvente son iguales), el porcentaje de modulación puede determinarse de la siguiente manera:

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

Entonces

$$Ma\% = \frac{(V_{max} - V_{min})}{(V_{max} + V_{min})} 100$$



En donde

$$V_{\max} = E_c + E_m$$

$$V_{\min} = E_c - E_m$$

El pico en la amplitud de la onda de salida ( $E_m$ ) es la suma de los voltajes de las frecuencias laterales superiores e inferiores.

Por lo tanto,  $E_m = E_{usf} + E_{isf}$  y  $E_{usf} = E_{isf}$

Entonces

$E_{usf}$  = amplitud pico de la frecuencia lateral superior (volts)

$E_{isf}$  = amplitud pico de la frecuencia lateral inferior (volts)

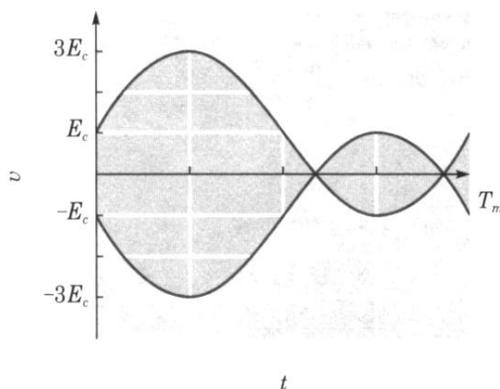
Si el porcentaje de modulación llega a 100% cuando  $E_m = E_c$ . Esta condición se muestra en la figura “d”. También puede observarse que en una modulación al 100%, la mínima amplitud de la envolvente es  $V_{\min} = 0$  V.

La figura “c” muestra una envolvente modulada al 50%; el cambio pico en la amplitud de la envolvente es igual a la mitad de la amplitud de la onda no modulada.

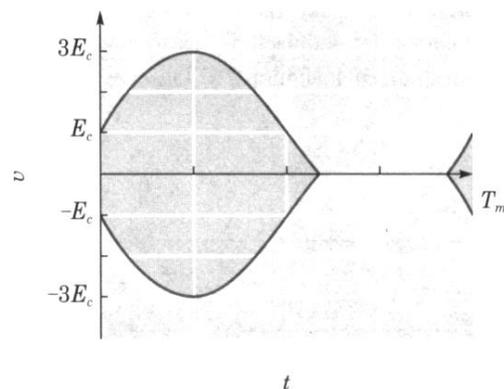
El porcentaje máximo que puede imponerse sin provocar una distorsión excesiva es del 100%.

### Sobremodulación

Cuando el índice de modulación es mayor que 1, se dice que hay sobremodulación. En la ecuación del tiempo de AM no hay nada que pudiera evitar que  $E_m$  fuera mayor que  $E_c$  y que  $m$  fuera mayor que 1. Sin embargo, hay dificultades prácticas.



(a)  $m = 2$  en la ecuación (3.5)



(b)  $m = 2$  con un modificador práctico

En la figura “a” se observa el resultado de sustituir  $m = 2$  en la ecuación original. Como puede verse, la envolvente ya no se asemeja a la señal moduladora, por consiguiente,  $m$  debe ser menor o igual a 1.

Siempre que trabajemos con modelos matemáticos, debe recordarse verificar contra la realidad física. Esta situación es un buen ejemplo. Es posible construir un circuito que produce una salida que concuerda con la ecuación de AM del tiempo, para  $m$  mayor que 1.

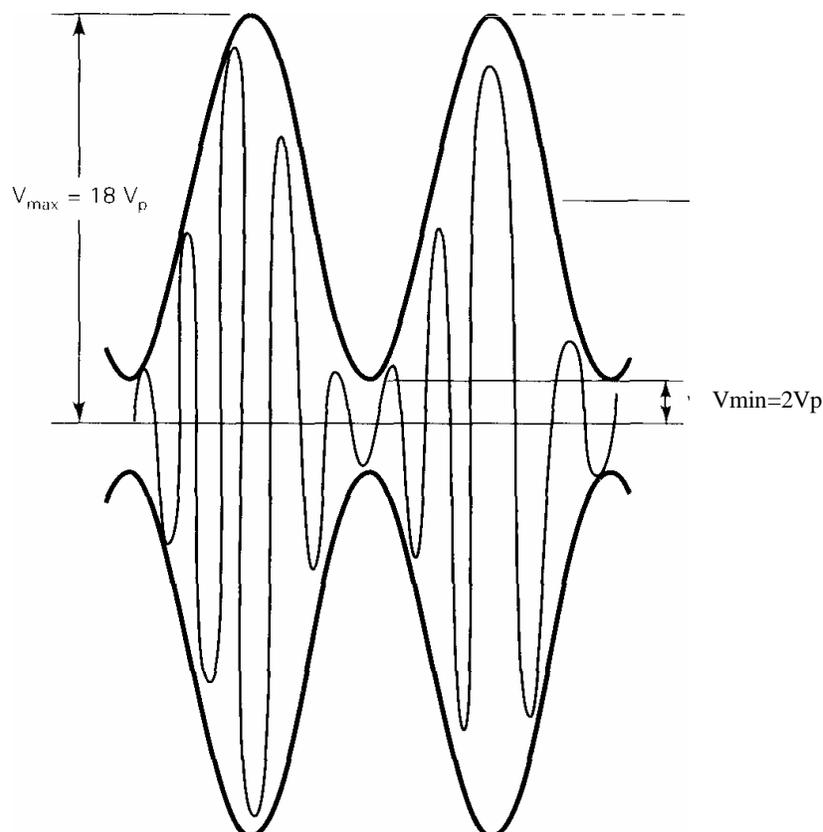
$$v(t) = V_c \cdot \text{sen} \omega_c t + \frac{m \cdot V_c}{2} \cdot \cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{m \cdot V_c}{2} \cdot \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

Sin embargo, en estas condiciones, la mayoría de los moduladores prácticos de AM producen la señal mostrada en la figura "b". Esta no es la forma de onda predicha por la ecuación, pero tiene la característica de que la envolvente de modulación ya no es una representación precisa de la señal moduladora. De hecho, si se somete al análisis de Fourier, se encontraría que las componentes "afiladas o puntiagudas" de la forma de onda, cuando la salida disminuye a cero en los picos de modulación negativa, representan componentes de alta frecuencia agregados a la señal en banda base original.

Con este tipo de sobremodulación se crean frecuencias laterales más alejadas de la portadora de lo que estarían en otro caso. Estas frecuencias espurias se conocen como distorsión por sobremodulación (splatter), y hacen que la señal modulada **tenga un ancho de banda mayor**.

Ejemplo

Para la forma de onda de AM siguiente,



Determine:

- 1.- Amplitud pico de la portadora no modulada.
- 2.- Amplitud pico de la envolvente.
- 3.- Amplitud pico de las frecuencias laterales superior e inferior.
- 4.- Coeficiente de modulación.
- 5.- Porcentaje de modulación.

Solución:

- 1.-  $V_c = \frac{1}{2} (V_{\max} + V_{\min}) = \frac{1}{2} (18 + 2) = 10 \text{ V}$
- 2.-  $V_m = \frac{1}{2} (V_{\max} - V_{\min}) = \frac{1}{2} (18 - 2) = 8 \text{ V}$
- 3.-  $V_{\text{usf}} = V_{\text{isf}} = m E_c / 2 = 0.8 \cdot 10 / 2 = 4 \text{ v}$
- 4.-  $m = 8 / 10 = 0,8$
- 5.-  $M_a\% = 0,8 \times 100 = 80\%$

### e.- Potencia de la señal modulada

Como la potencia es proporcional a la tensión, el espectro de potencias tiene una forma similar al espectro de tensiones, donde la amplitud máxima de cada banda lateral está dado

por  $ma = \frac{V_m}{V_c}$  y teniendo en cuenta que la potencia es proporcional al cuadrado de la tensión, tendríamos las siguientes relaciones:

La potencia de portadora sin modular es  $P_c = \frac{V_c^2}{2R_L}$

Por lo tanto, la potencia en las bandas laterales será  $P_{BLS} = P_{BLI} = \frac{m^2 V_c^2}{8R_L} = \frac{m^2}{4} P_c$

Y la potencia total de una señal modulada en amplitud será

$$P_m = P_c + P_{BLI} + P_{BLS}$$

$$P_m = P_c + \frac{m^2}{4} P_c + \frac{m^2}{4} P_c$$

O sea

$$P_m = P_c + \frac{m^2}{2} P_c$$

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

Como se puede apreciar, la potencia será mayor cuanto mayor el índice de modulación utilizado y la potencia de la portadora independiente si hay o no modulación

Ejemplo;

Supongamos un circuito modulador de AM, como el esquemático, que transmite una señal de audio cuya banda base se ha limitado en banda entre 100hz y 5Khz, la frecuencia de portadora debe poder sintonizarse entre 600 y 1200 Khz, donde la  $V_c=10V_{pico}$  (tensión de portadora) y se desarrolla sobre una  $R_L=10$  ohms, con un índice de modulación  $m=1$

Determinar

- 1.- Potencia de Portadora y de las bandas laterales superior e inferior
- 2.- Potencia total de la banda lateral
- 3.- Potencia total de la onda modulada
- 4.- Dibuje un espectro de potencia
- 5.- Recalcule para  $m=0,5$

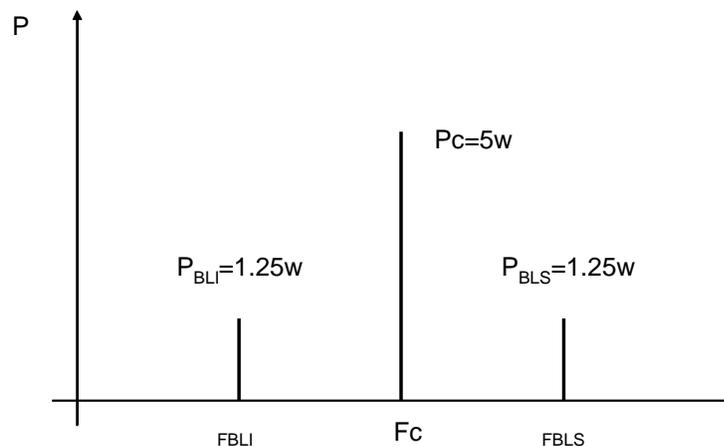
$$1.- P_c = \frac{V_c^2}{2R_L} = \frac{10^2}{2 \times 10} = 5w$$

$$2.- P_{BLS} = P_{BLI} = \frac{m^2 V_c^2}{8R_L} = \frac{m^2}{4} P_c = \frac{1}{4} 5w = 1.25w$$

$$3.- P_m = P_c + P_{BLI} + P_{BLS} = 5 + 2 \times 1.25w = 7.5w$$

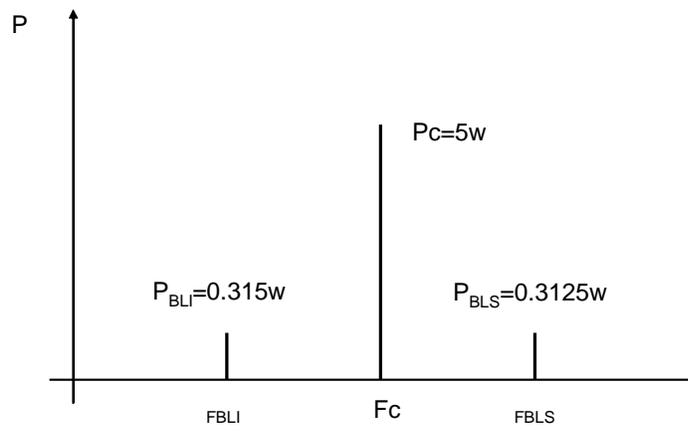
$$P_m = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) = 5w \left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{3}{2} \times 5w = 7.5w$$

4.-

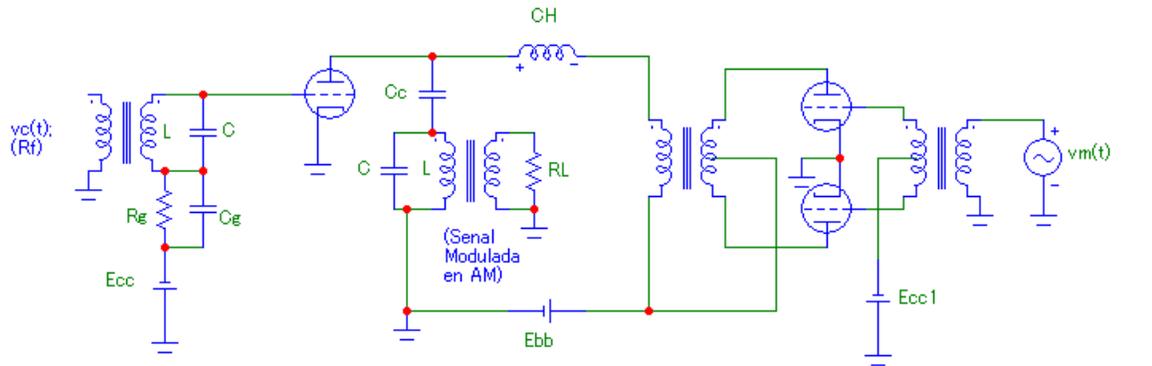


$$5.- P_{BLS} = P_{BLI} = \frac{m^2}{4} P_c = \frac{(0.5)^2}{4} 5w = 0.3125w$$

$$P_m = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) = 5w \left(1 + \frac{(0.5)^2}{2}\right) = 1.25 \times 5w = 6.25w$$

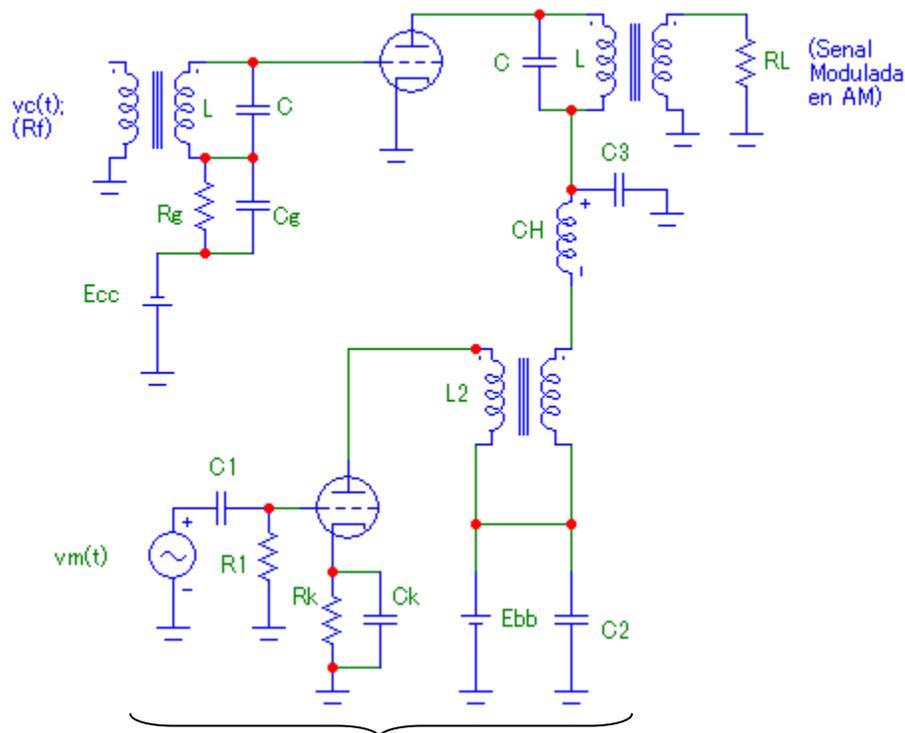


## f.- Esquema de Circuito Modulador en Placa tipo práctico

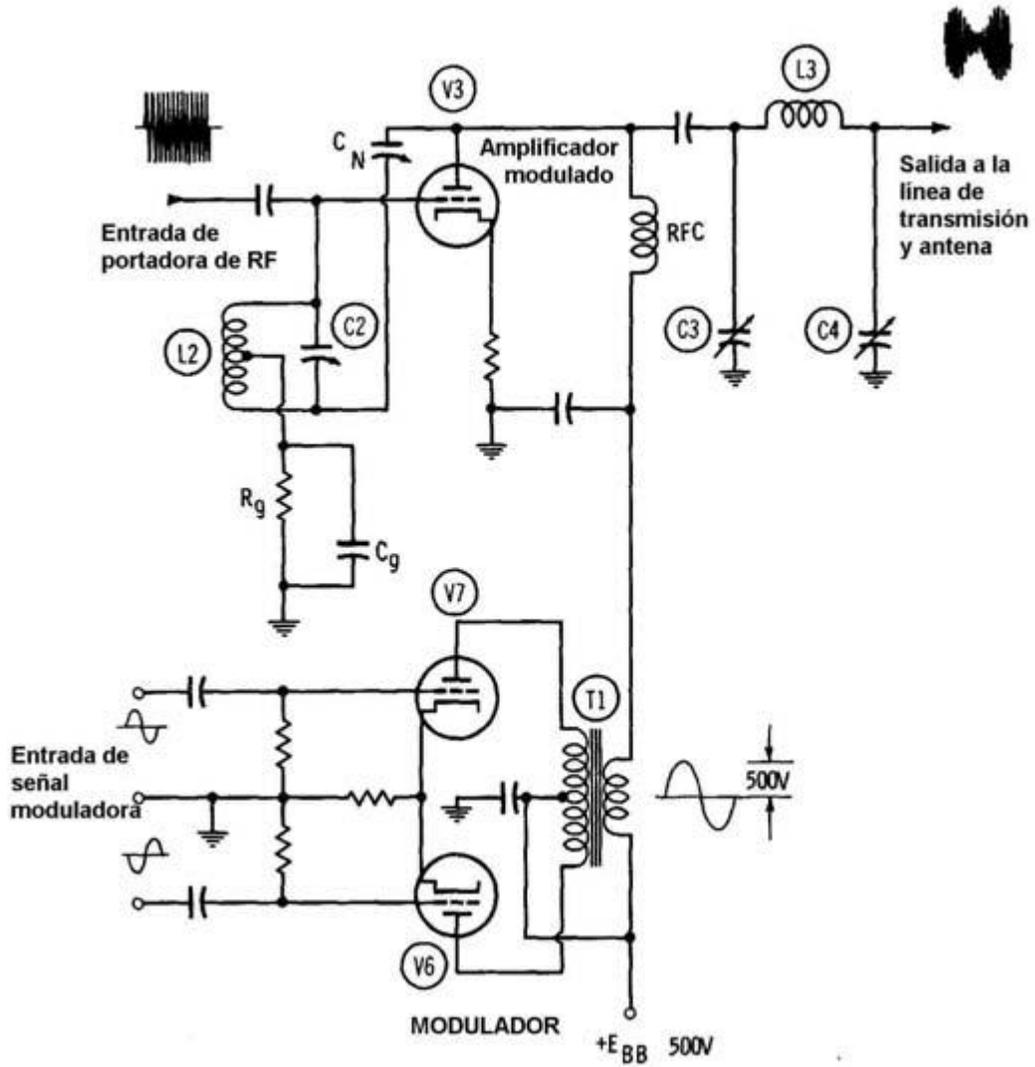


Circuito Amplificador Clase "C"

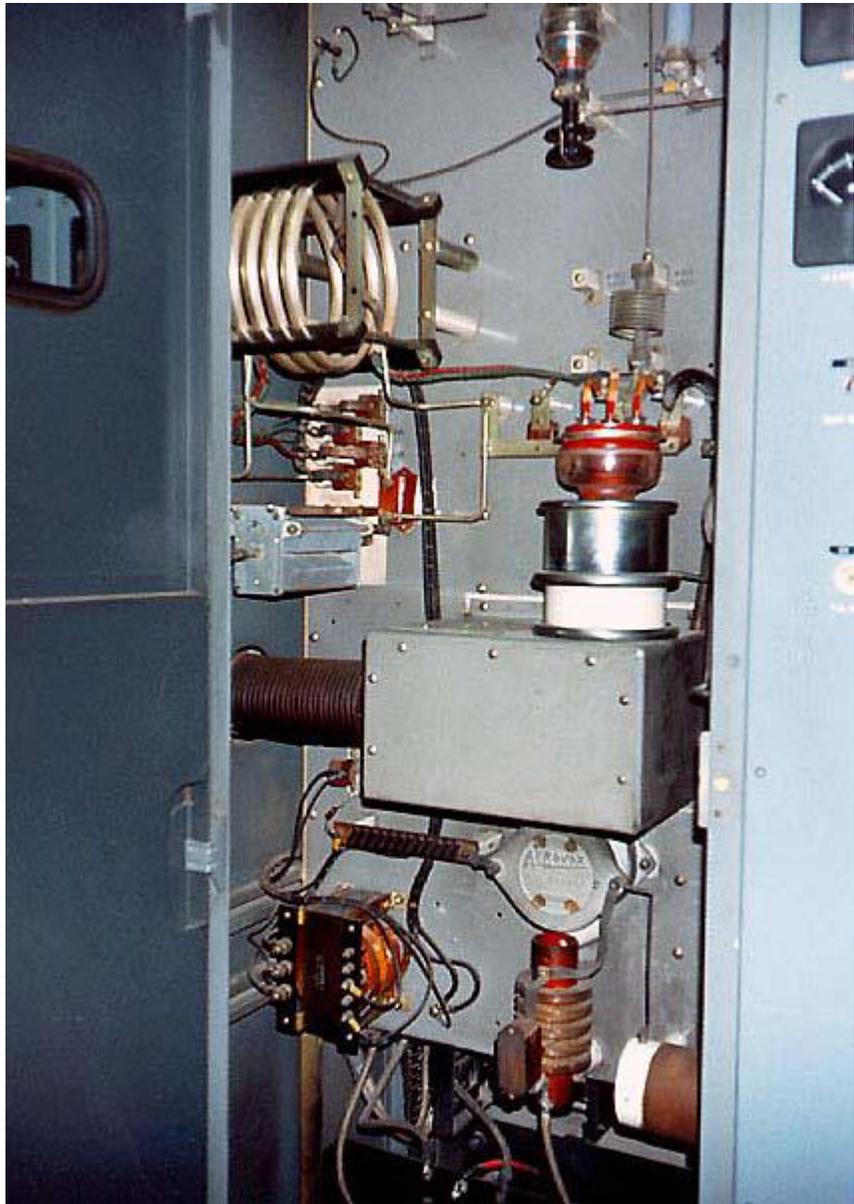
Amplificador de Potencia Clase "B"  
(modulador)



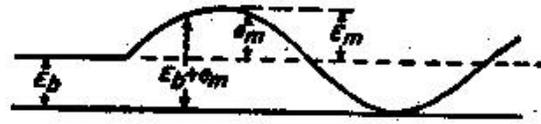
Circuito Amplificador Clase "A"



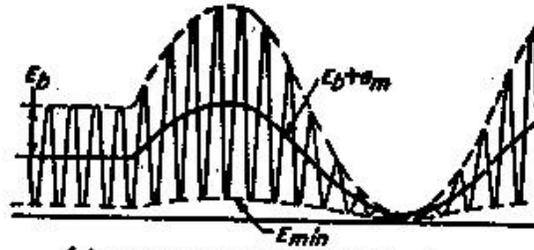
Amplificador Clase C – Modulado en Placa



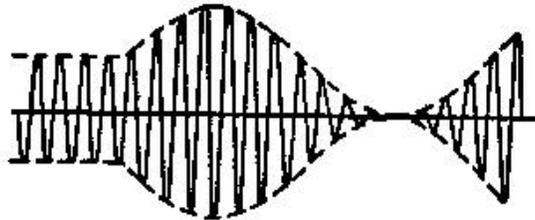
g.- Formas de Onda



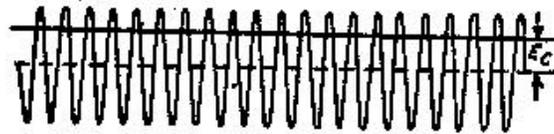
(a) TENSION EQUIVALENTE DE ALIMENTACION DE PLACA



(b) TENSION TOTAL APLICADA A LA PLACA



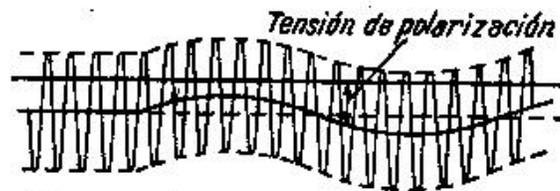
(c) TENSION DE RF ENTRE PLACA Y CATODO



(d) TENSION QUE ACTUA EN LA REJA DE CONTROL POLARIZACION FIJA Y REGULACION PERFECTA DE LA TENSION DE RF



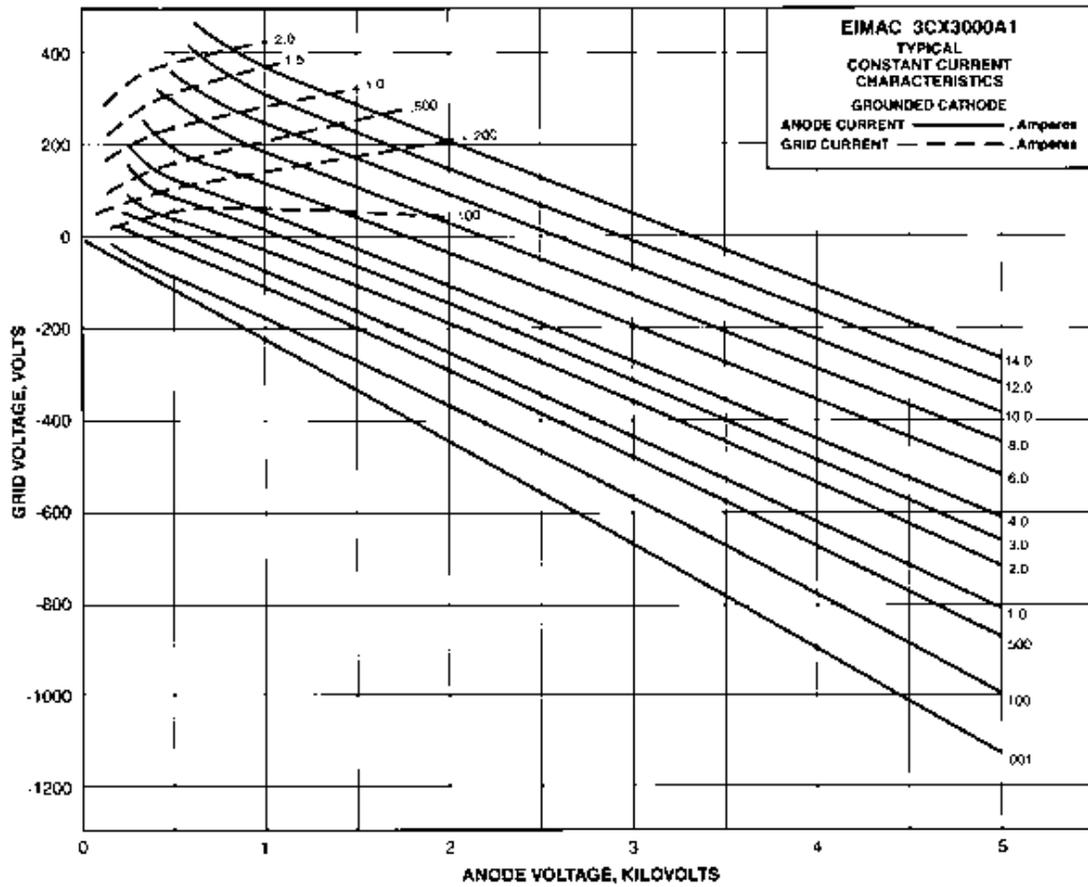
(e) CORRIENTE DE REJA PARA POLARIZACION FIJA Y REGULACION PERFECTA DE LA TENSION DE RF



(f) TENSION REALMENTE APLICADA A LA REJA CON POLARIZACION POR ESCAPE Y PERFECTA REGULACION DE LA TENSION DE RF

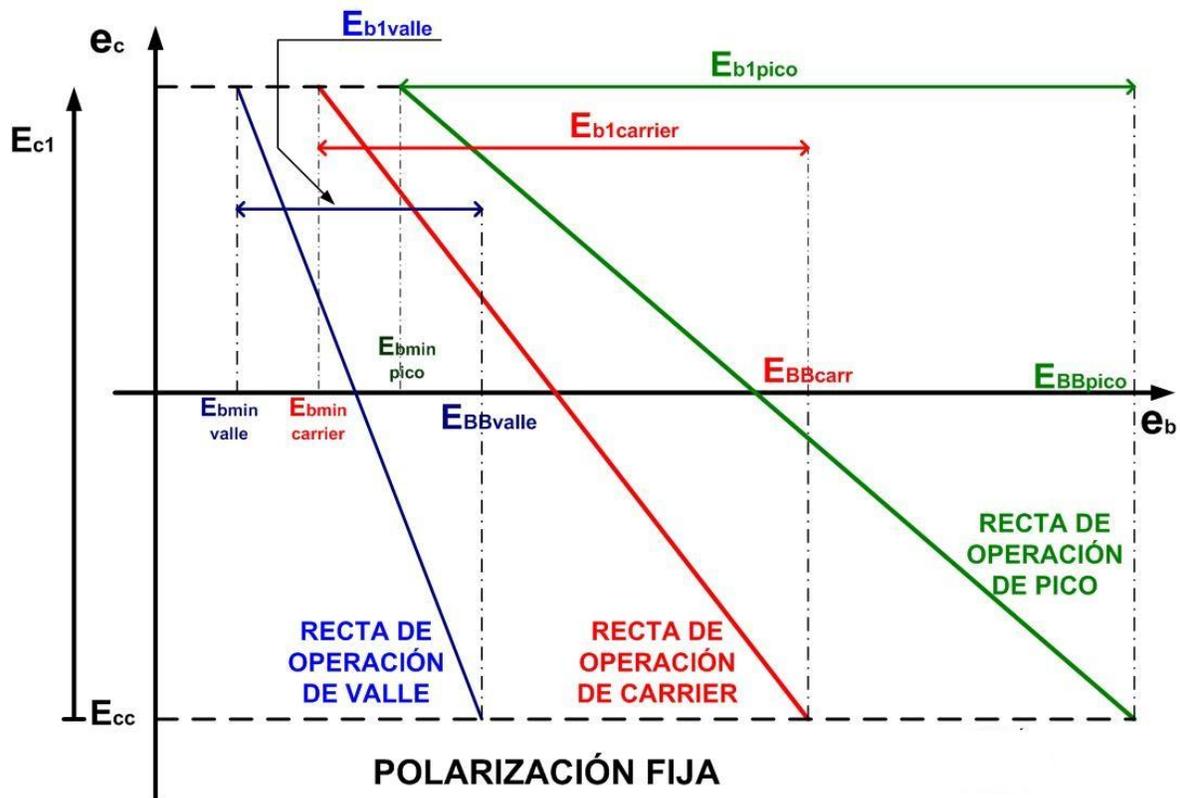
## h.- Análisis de Modulación (Rectas de Operación Múltiples)

A.- Características de la válvula

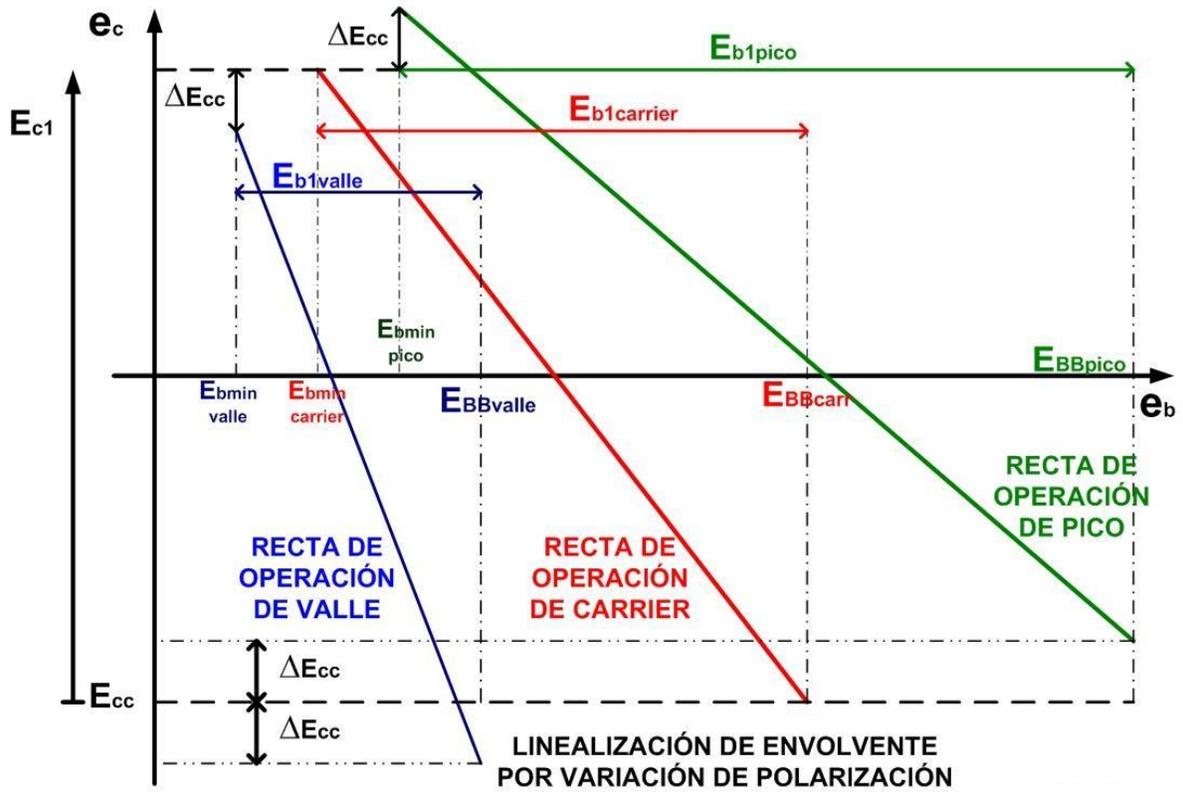


B.- Trazado de rectas de operación sin y con modulación, se supone un funcionamiento lineal entre  $E_c$  y  $E_{bb}$ .

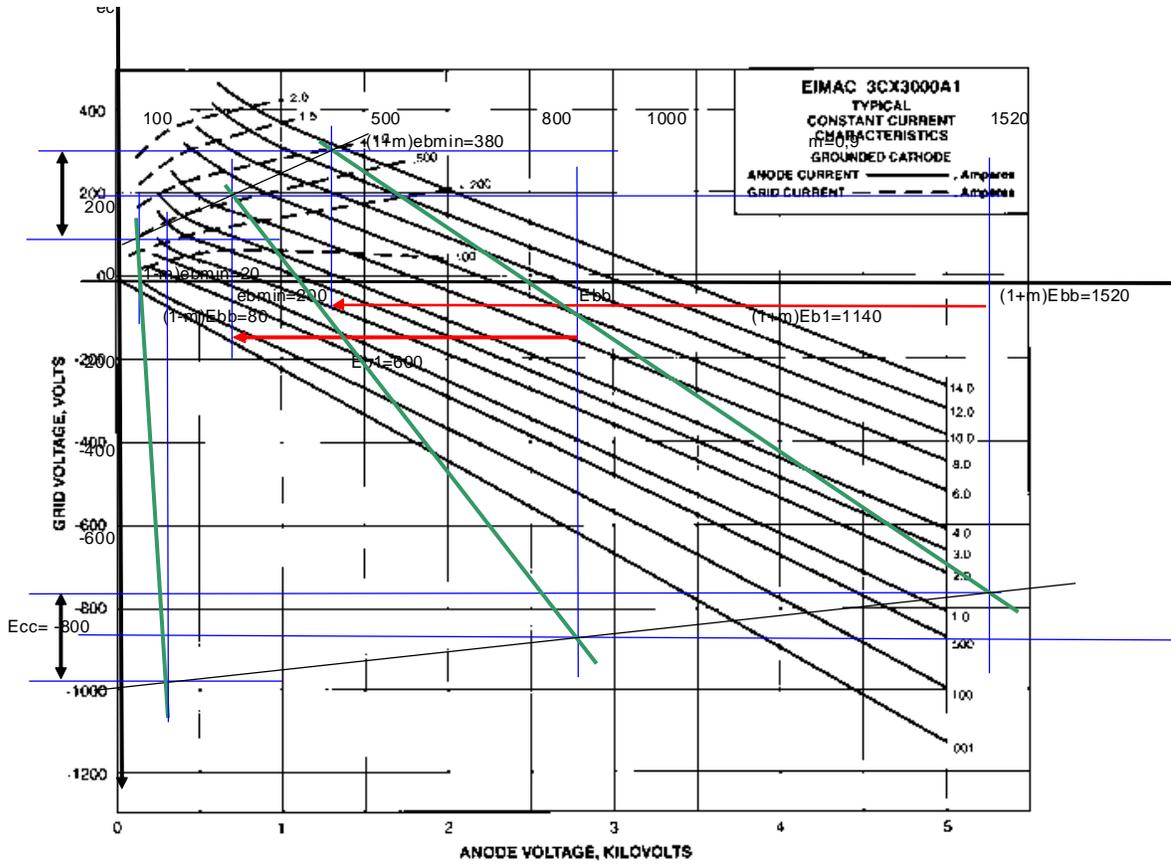
Aclaración: este gráfico está incompleto, porque faltan las corrientes de la válvula, ya sea de placa como de reja, se dibuja al solo efecto de ver más claramente el área de trabajo del amplificador modulado en placa



C. – Linealización de la envolvente



D. – Vista de integración de uno de los gráficos con las curvas



## 4.- Transmisores de AM

La modulación de amplitud en doble banda lateral con portadora, se puede obtener por diversas técnicas:

- 1.- la modulación en bajo nivel
- 2.- por variación de la tensión de alimentación del amplificador de potencia de RF por acoplamiento a transformador
- 3.- por variación de la tensión de alimentación del amplificador de potencia de RF por control serie
- 4.- por control de la tensión de polarización de compuerta de un amplificador de potencia de RF en clase con Fet
- 5.- por salida en fase

La primera y la quinta de las técnicas enunciadas, requiere amplificadores de potencia lineales que veremos cuando expliquemos banda lateral única.

Las otras técnicas si bien han sido descritas las resumiremos a continuación; para establecer los requerimientos de los amplificadores de un transmisor de AM, es necesario establecer las relaciones de potencia de la señal de AM

La potencia de portadora sin modular es  $P_c = \frac{V_c^2}{2R_L}$

La forma de la tensión de salida  $v(t) = V_c[1 + m \sin w_m t] \sin w_c t$

El índice de modulación  $m < 1$ , para una modulación sin distorsión

La potencia pico de envolvente  $PEP = (1 + m)^2 P_c \leq 4P_c$

La potencia en las bandas laterales será  $P_{BLS} = P_{BLI} = \frac{m^2 V_c^2}{8R_L} = \frac{m^2}{4} P_c$

La potencia total de una señal modulada en amplitud o potencia promedio, será

$$P_m = P_c + P_{BLI} + P_{BLS}$$

$$P_m = P_c + \frac{m^2}{4} P_c + \frac{m^2}{4} P_c$$

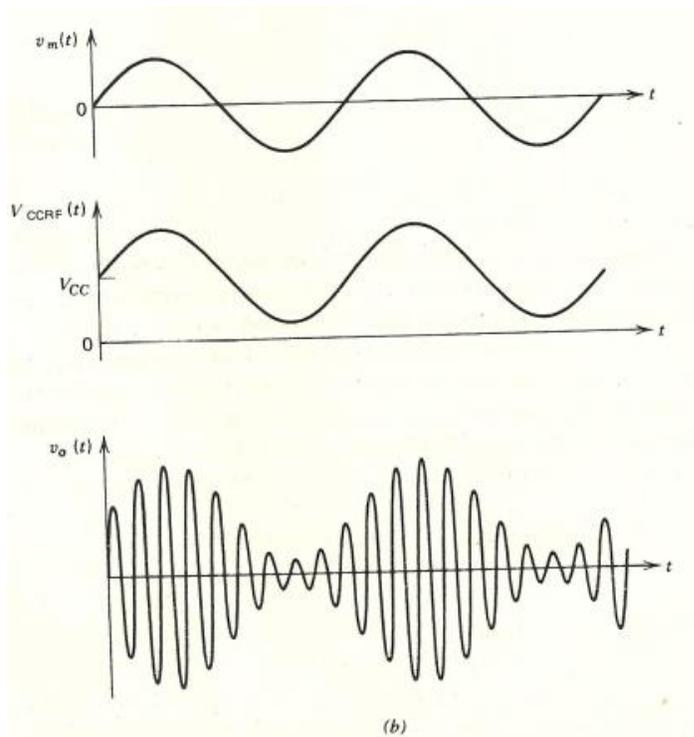
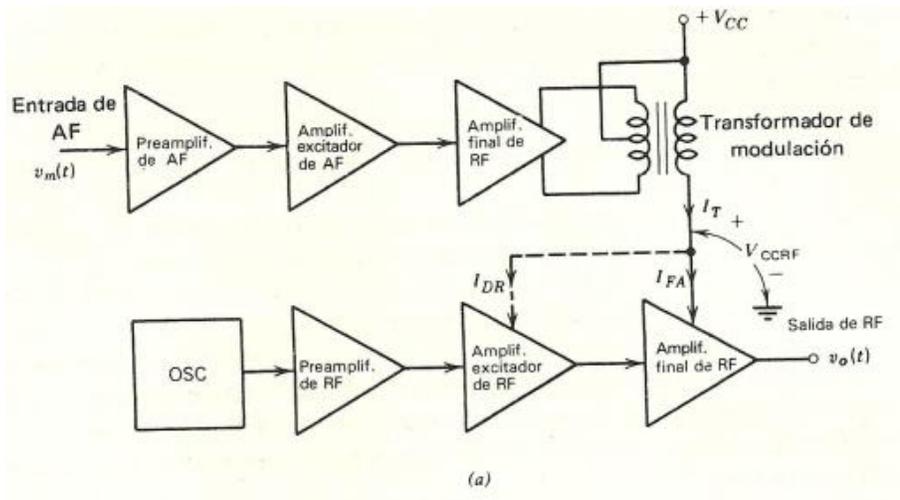
$$P_m = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$$

Veamos algunos ejemplos con elementos activos:

### a.- Modulador con colector o drenaje acoplado a transformador

En estos circuitos, podemos observar que la tensión de alimentación de colector o drenaje o placa del amplificador final de RF como hemos visto y la del excitador se encuentran por arriba y por debajo de  $V_{CC}$  y el circuito debe entregar la PEP cuando la  $V_{CCrf} = 2V_{CC}$   
 A su vez podemos decir que  $P_{cc} = P_c / \eta_{rf}$  y el modulador deberá entregar

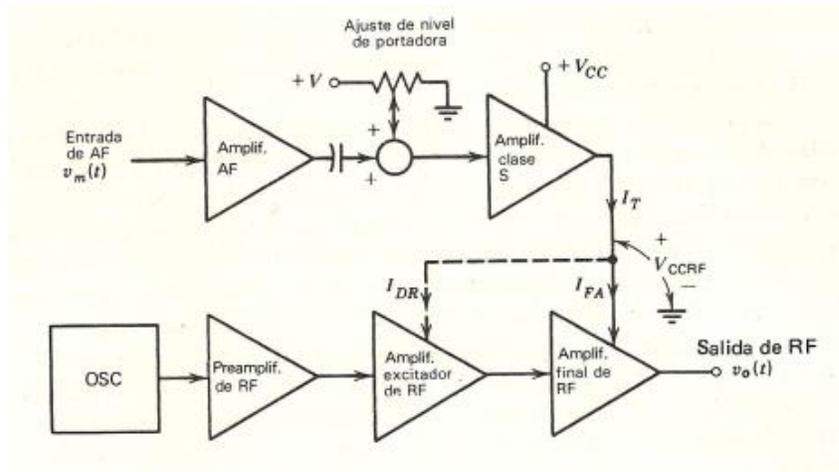
$$P_{mod} = \frac{(P_m - P_c)}{\eta_{rf}} = \frac{pot.bandas.laterales}{\eta_{rf}}$$



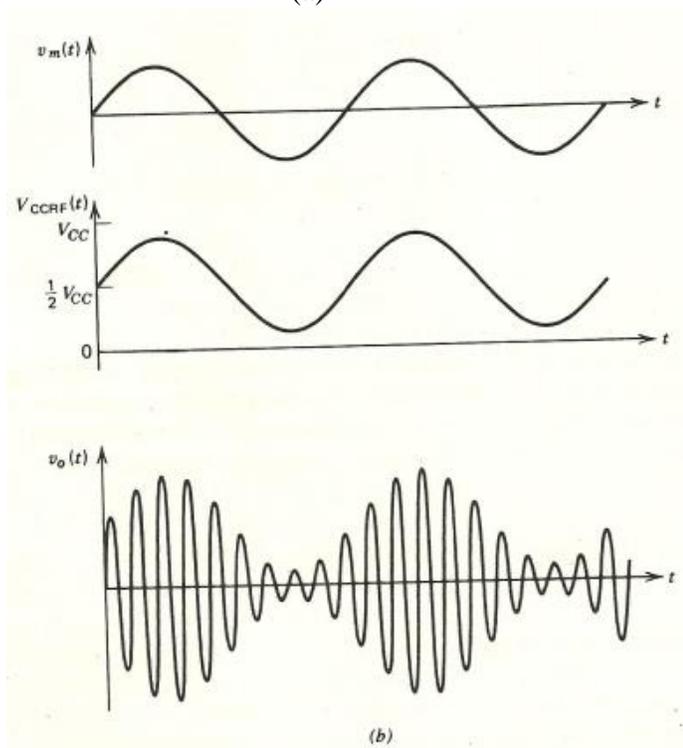
a) Diagrama en bloques      b) formas de onda

## b.- Modulador con colector o drenaje acoplado en serie

La técnica utilizada en este circuito es similar a la de acoplamiento por transformador, pero como aquí la tensión de salida del modulador no puede exceder la  $V_{CC}$ , la PEP se producirá con esta tensión, por lo cual, debemos observar que la tensión de alimentación que da lugar a la portadora no modulada es igual a  $\frac{1}{2} V_{CC}$ . La ventaja de esta forma de modulación es no tener que utilizar el transformador de modulación, fundamentalmente por su precio, y la utilización de un amplificador clase S, es adecuado para esta técnica de modulación cuando se requiere eficiencia (este amplificador se verá al ver modulación por ancho de pulso, PWM), caso contrario puede utilizarse un amplificador / modulador clase A



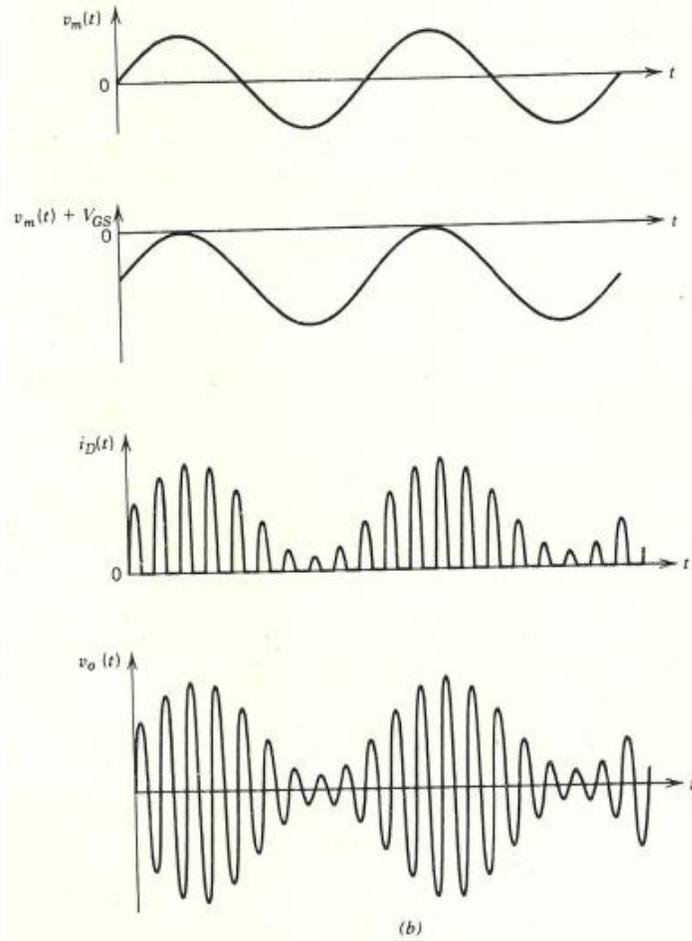
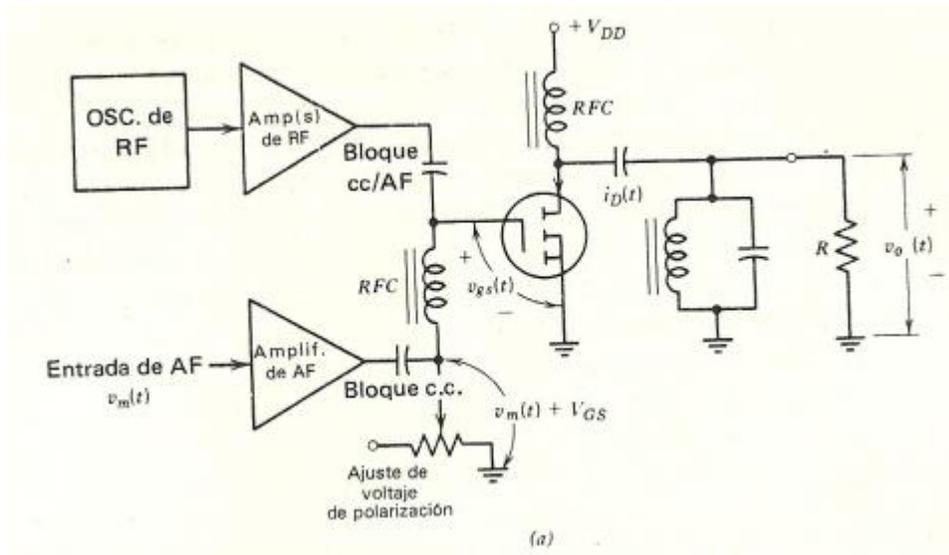
(a)



(b)

a) Diagrama en bloques b) formas de onda

### c.- Modulador con polarización de compuerta



a) Diagrama en bloques b) formas de onda

## 5.- Multiplicadores de frecuencia

Una forma especial del amplificador clase C es la de multiplicador de frecuencia, cualquier amplificador clase C tiene la capacidad de realizar la multiplicación si el circuito sintonizado en el colector entra en resonancia a un múltiplo entero de la frecuencia de entrada. Por ejemplo, un duplicador de frecuencia se puede construir con sólo conectar un circuito sintonizado paralelo que entre en resonancia al doble de la frecuencia de entrada, en el colector de un amplificador clase C. Cuando ocurre el pulso de corriente del colector, el circuito sintonizado se excita, y éste replica al doble de la frecuencia de entrada.

Un circuito triplicador se conforma de la misma manera, excepto que el circuito sintonizado entra en resonancia al triple de la frecuencia de entrada. De este modo, el circuito sintonizado recibe un pulso de entrada por cada tres ciclos de oscilación que produce.

Pueden elaborarse multiplicadores para incrementar la frecuencia de entrada en un factor entero de hasta aproximadamente 10. Cuando el factor de multiplicación aumenta, la potencia de salida del multiplicador se reduce. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, los mejores resultados se obtienen con multiplicadores de valor 2 y 3.

Otra forma de visualizar la operación de los multiplicadores de frecuencia clase C es recordar que el pulso de corriente no senoidal es rico en armónicas. Cada vez que ocurre el pulso se generan las armónicas segunda, tercera, cuarta, quinta, y demás. El propósito del circuito sintonizado activo en el colector es actuar como filtro para seleccionar la armónica deseada.

En muchas aplicaciones, se requiere un factor de multiplicación mayor que el que puede conseguirse con una sola etapa de multiplicación. En estos casos, se conectan dos o más multiplicadores en cascada. La figura siguiente ilustra ejemplos con dos multiplicadores. En el primer caso se conectan en cascada multiplicadores de valor 2 y 3 para producir una multiplicación global de 6. En el segundo ejemplo, tres multiplicadores proporcionan una multiplicación global de 30. El factor de multiplicación total es el producto de los factores de multiplicación de las etapas individuales.

