

Amplificadores clase D

El amplificador en un sistema de audio será el encargado de amplificar la entrada hasta un cierto nivel capaz de manejar el altavoz de manera que el sonido pueda ser escuchado con una presión sonora adecuada al espacio a sonorizar. Cuando estos espacios son grandes, la cantidad de presión necesaria precisa de grandes cantidades de potencia eléctrica que debe suministrarse a los altavoces siguiendo la referencia de la señal de audio original. En estos casos se precisa de amplificadores capaces de controlar el altavoz de la manera más precisa posible, a la par de suministrar la potencia requerida, respetando en todo momento la dinámica propia del tema musical.

Tradicionalmente se han empleado amplificadores donde el transistor de potencia trabaja en su zona lineal. Éstas son algunas de las topologías más utilizadas:

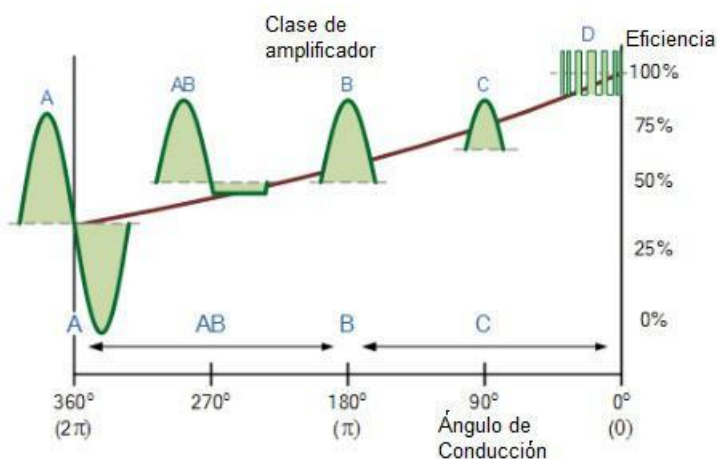
- **Amplificador en clase A.** En esta modalidad todos los elementos activos de la etapa de salida se encuentran conduciendo en su zona lineal durante la amplificación. Se emplean en equipos hi-fi donde el rendimiento no es importante, dado que presentan una distorsión armónica muy reducida.

- **Amplificador en clase B.** En el amplificador en clase B se emplean dos elementos activos en la etapa de salida, de manera que cada uno de ellos conduce tan sólo en el semiciclo positivo o negativo de la señal de entrada. De esta manera se consigue un mejor rendimiento debido a que el transistor tan sólo conduce durante el 50% del ciclo completo, pero con mayor distorsión originada por la zona de transición o “crossover”.

- **Amplificador en clase AB.** En esta configuración se permite que los dos transistores de la etapa de salida conduzcan al mismo tiempo durante un breve instante de tiempo para evitar la distorsión en los cruces por cero. Dado que puede alcanzarse un rendimiento mayor que en clase A con menor distorsión que en clase B es el más comúnmente usado.

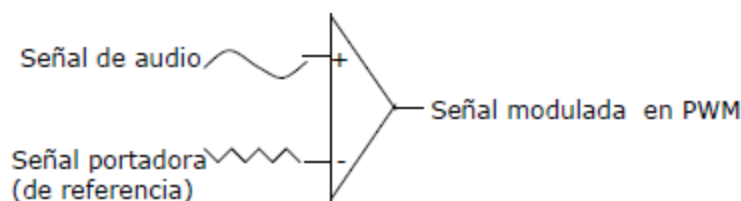
-Amplificadores clase D

Utilizan la técnica de modulación por ancho de pulso y están compuestas por un modulador (comparador), una etapa de conmutación con ganancia (con MOSFET), y un demodulador (filtro pasivo LC), admiten señales analógicas o digitales; con las analógicas hay muy poca distorsión y con las digitales aparece distorsión en los múltiplos de las frecuencias de la señal de entrada. En la práctica tienen una eficiencia mayor del 95%, buena linealidad, circuitos simples, sus disipadores son 6 veces más pequeños cada vez que se duplica la resistencia térmica y por ende son más livianos y baratos. La figura muestra las curvas típicas de eficiencia en función de la potencia de salida

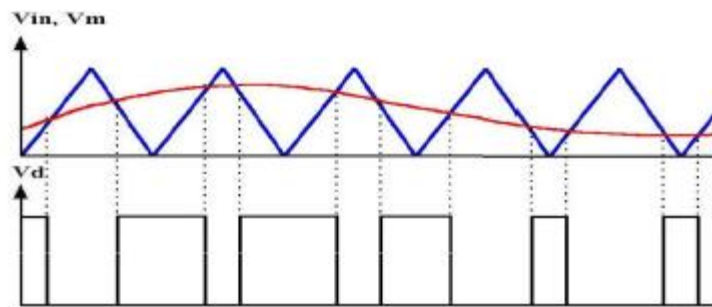


Modulación por ancho de pulso (PWM):

Es una forma de codificar una señal cuantificándola por la duración de un pulso digital. Se realiza con un comparador que modula la señal de audio con una señal portadora triangular de una frecuencia de 5 a 50 veces mayor que la máxima que queremos amplificar (supera los 300KHz).



En la gráfica se ve como el comparador convierte la señal de audio y la triangular en una señal de pulsos rectangulares con diversos ciclos de trabajo proporcionales a los niveles de la señal de entrada en cada punto del muestreo, (los anchos de pulso dependen del lugar en que se produce el encuentro de la señal senoidal con la triangular).



Donde:

V_{in} = Señal de audio (roja).

V_m = Señal portadora triangular (azul).

V_d = Señal modulada en PWM.

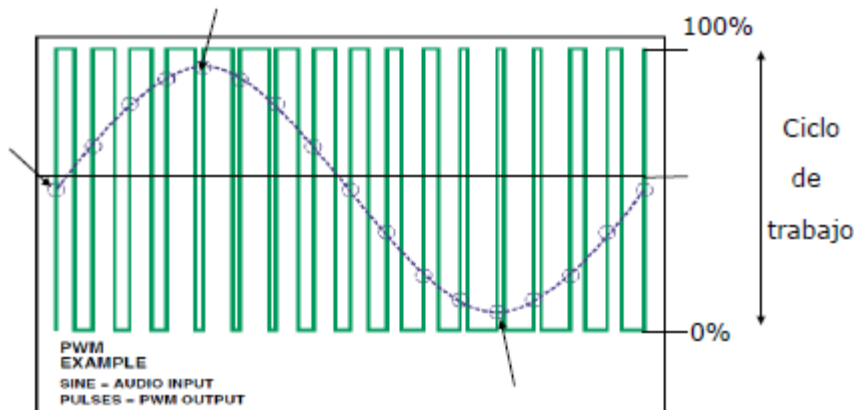
Para que el tren de pulsos PWM sea lineal, la amplitud y frecuencia de la señal triangular deben ser constantes, y la frecuencia de conmutación y sus armónicos no deberían caer dentro de la banda de AM, ni dentro de la banda de FM; además para evitar silbidos audibles, el valor de la relación señal-ruido (SNR) debe superar:

Los 90 dB en amplificadores de baja potencia.

Los 100 dB en amplificadores de mediana potencia.

Los 110 dB en amplificadores de alta potencia.

Gráfica de los valores que va tomando el ciclo de trabajo:



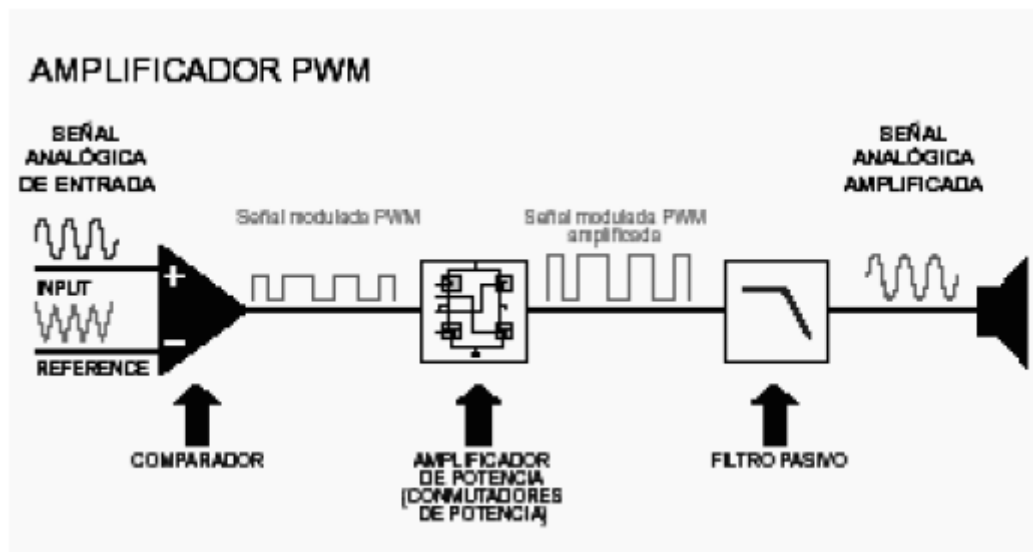
Cuando la señal de audio está en 0V, el ciclo es del 50%. Cuando está en el máximo positivo, es de casi el 100%. Cuando está en el máximo negativo, está cerca del 0%.

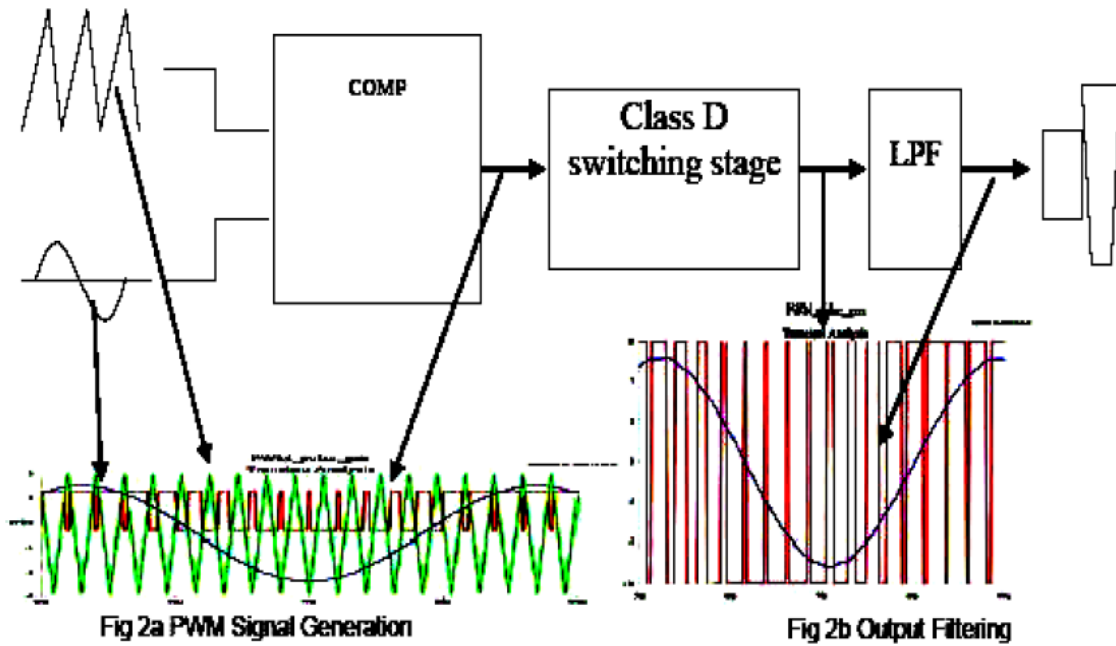
Un beneficio de esta modulación es que con un buen diseño se puede alcanzar una calidad de sonido mayor que 60dB y una distorsión armónica total menor que el 0,01%). La máxima potencia de salida con modulación PWM es menor a la teórica, porque sus moduladores no alcanzan la modulación completa (cuando el ciclo de trabajo es 0% o 100%).

Al amplificador de clase D se lo puede encontrar en dos topologías:

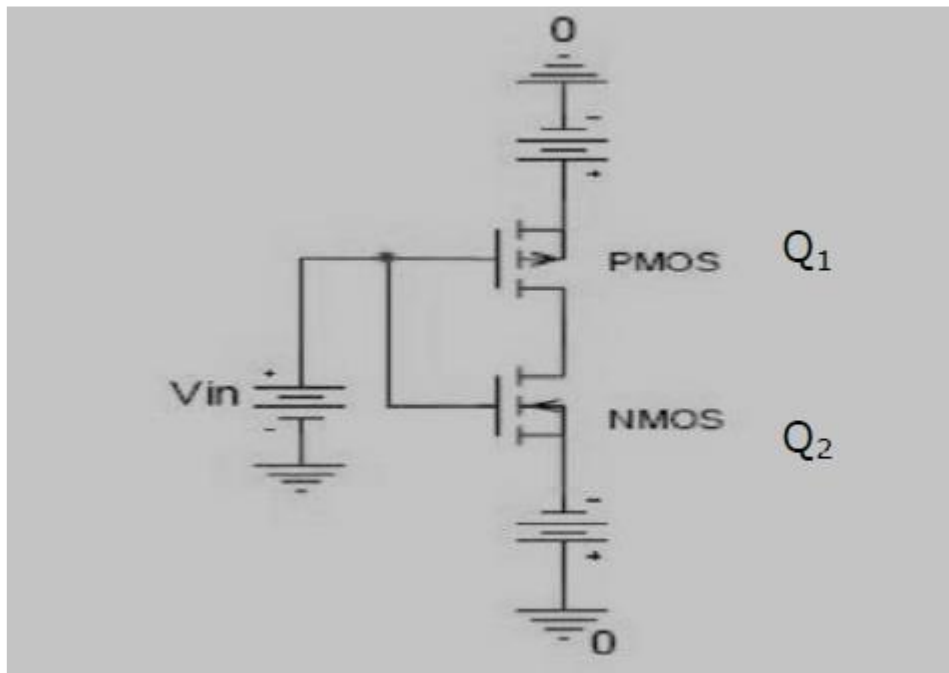
- 1) Half Bridge o Single Ended (SE)
- 2) full Bridge o Bridge tied Load (BTL).

1) Conexión Medio puente, Single ended (SE) o Half bridge:



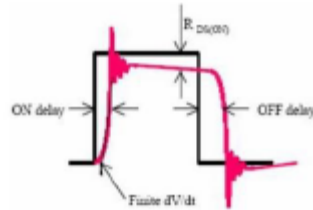


Como se ve en la segunda figura, en la entrada del comparador hay una señal portadora (verde) que modula la de audio (azul) y en la salida tenemos la señal modulada en PWM (roja). En el próximo paso la señal PWM es amplificada por una etapa de potencia con dos MOSFET complementarios (de canal n (NMOS) y de canal p (PMOS)) que actúan como llaves.

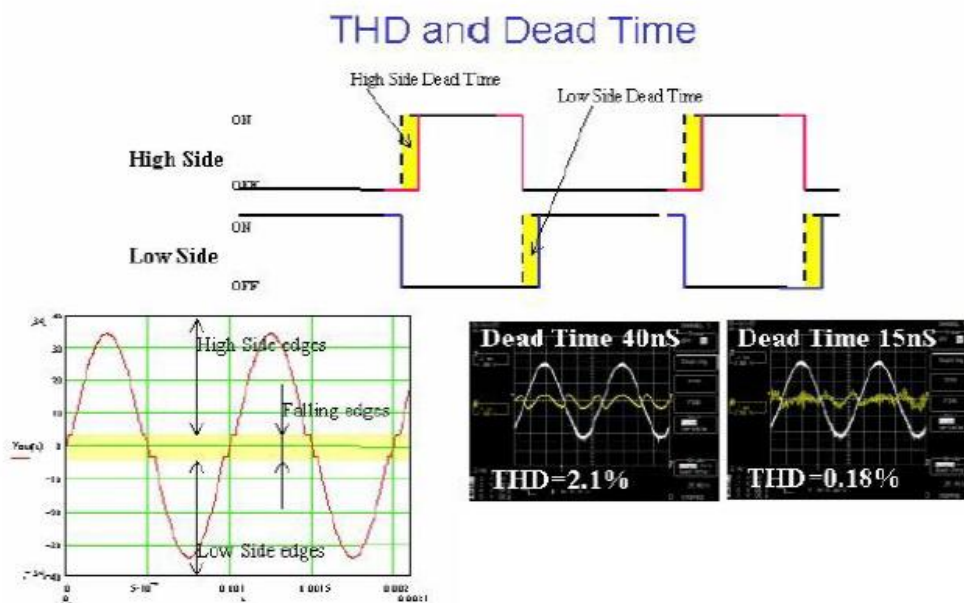


Cuando V_i es positiva, conduce Q1 y Q2 está al corte. Cuando V_i es negativa, conduce Q2 y Q1 está al corte.

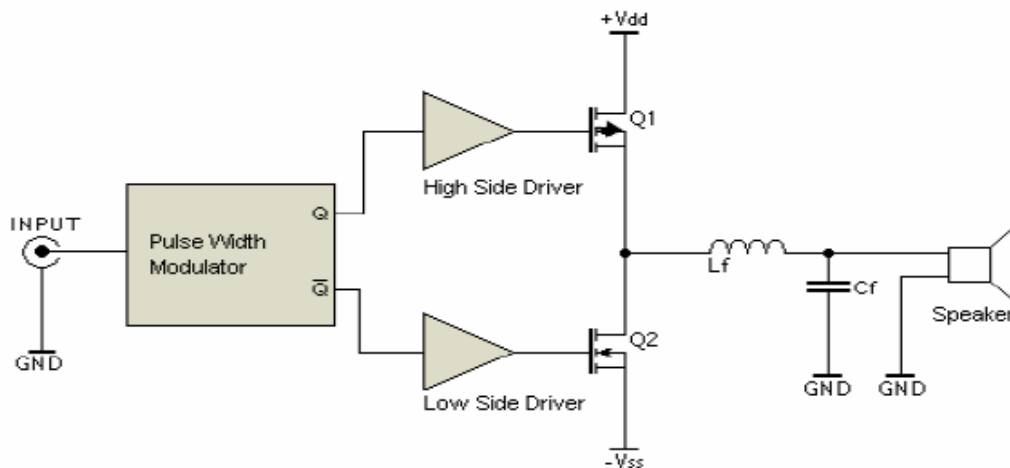
Cuando el tiempo de carga y descarga de los gates es superior a 20 nSeg, los pulsos de subida y bajada en la salida no son iguales



y se pueden producir fenómenos de **ringing** (oscilaciones no deseadas). Si por alguna razón ambos transistores se disparan al mismo tiempo, se produce un corto circuito que puede destruir los MOSFET. Para compensar esto se introduce un Driver en cada gate para crear un pequeño tiempo muerto (entre 5 nSeg y 100 nSeg). La adición de este tiempo aumenta la distorsión y para bajarla deben utilizarse tiempos muertos lo más pequeños posible.

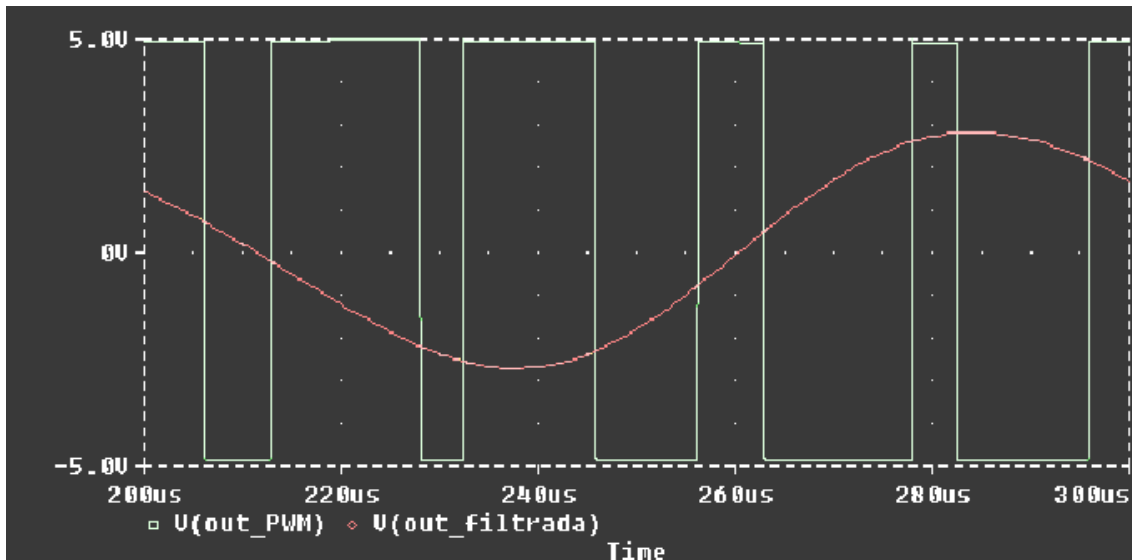


Y el circuito básico quedará

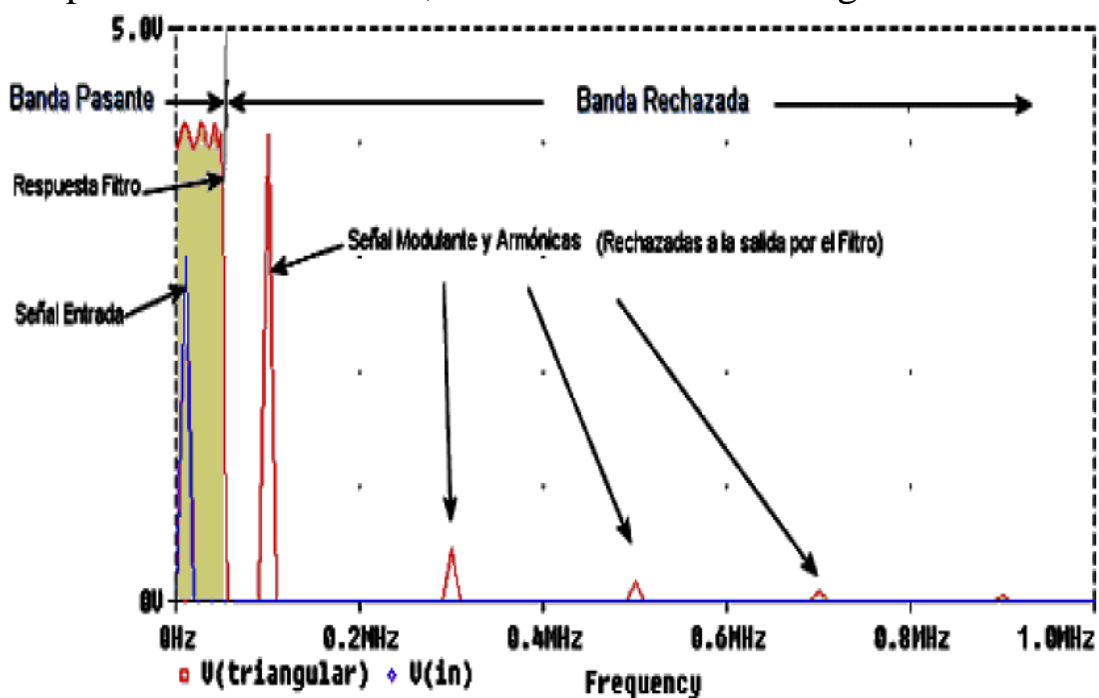


Una característica importante del Half bridge (SE) es que uno de los bornes del parlante va conectado a masa. Se utilizan MOSFET porque en sus gates tienen capacidades parásitas (C_{DG} y C_{GS}) que ante la circulación de una I_D se interconectan en paralelo y dan por resultado una capacidad total de 1090 pF, que produce tiempos muertos bajos y conmutaciones rápidas.

Debido a que la reactancia capacitiva de los transistores varía con la frecuencia aparecen transitorios en la carga (IME) que se pueden compensar conectando diodos Schottky en paralelo con las capacidades parásitas y con blindajes. A la salida de esta segunda etapa tenemos la señal de audio de la entrada amplificada, con la modulante y armónicos.

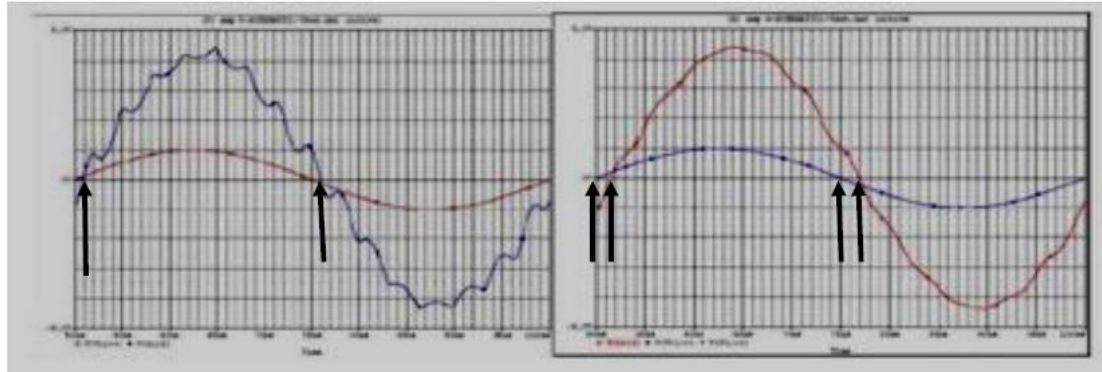


Para recuperar la señal de audio amplificada se debe eliminar la modulante y armónicas con un filtro pasivo LC. Si el filtrado es deficiente: aparecen componentes indeseables que afectan el rendimiento, la THD, pero no la audición. Con un buen filtrado: se obtiene un alto rechazo a las componentes indeseables, como se muestra en la grafica.



Típicamente se utiliza un filtro pasa bajo tipo Butterworth de 2° orden, de 12 db/octava que tiene un rechazo a la frecuencia portadora de 40 db, y una frecuencia de corte ligeramente por encima de la banda de audio (20Hz-20kHz). Cuando las cantidades de radiación electromagnética (EMI) que circulan a

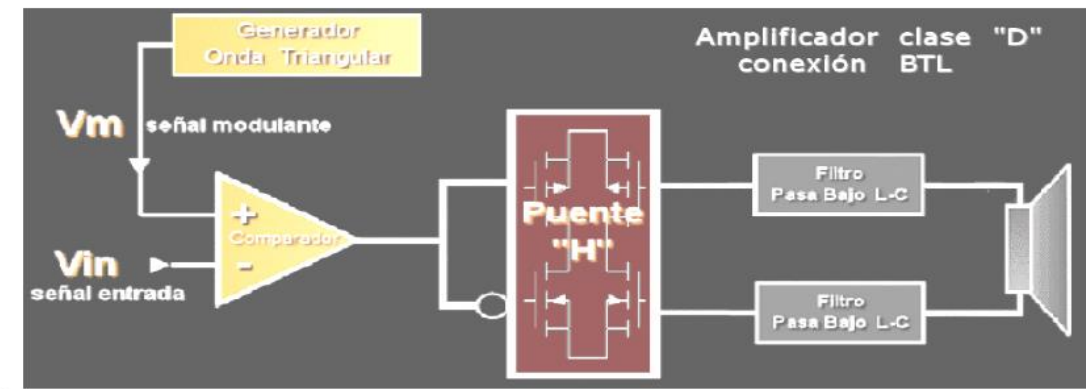
través de los cables del altavoz son grandes, influyen en el audio que irradia el altavoz. Para reducirla debe mantenerse el filtro lo más cerca posible del amplificador, trenzar los pares de cables del altavoz etc. Para minimizar aun más la distorsión por armónicos y no tener problemas de (EMI), la frecuencia de la señal triangular debe ser $f_t \approx 300\text{kHz}$ y para minimizar el ripple $f_c \ll f_t$ (idealmente $f_c \approx 20\text{kHz}$). En este tipo de filtros no se utilizan capacitores electrolíticos sino de polipropileno con valores entre los 200 nF y 1uF. A frecuencias superiores de 10kHz pueden aparecer cambios de fase que traen retrasos, por lo que en el diseño del filtro habrá que tener en cuenta dos variables críticas: el cambio de fase y el ripple. Le daremos más importancia al cambio de fase, para esto debemos trabajar con una f_c alta: Aumentando el valor de la inductancia: aumenta el desplazamiento de fase, pero se reduce la ondulación. Aumentando el valor del capacitor: se reduce la ondulación, y disminuye el desplazamiento de fase. Si utilizamos un filtro de 4° orden, se reduciría aún más la cantidad de armónicos (sin cambios sustanciales de fase).



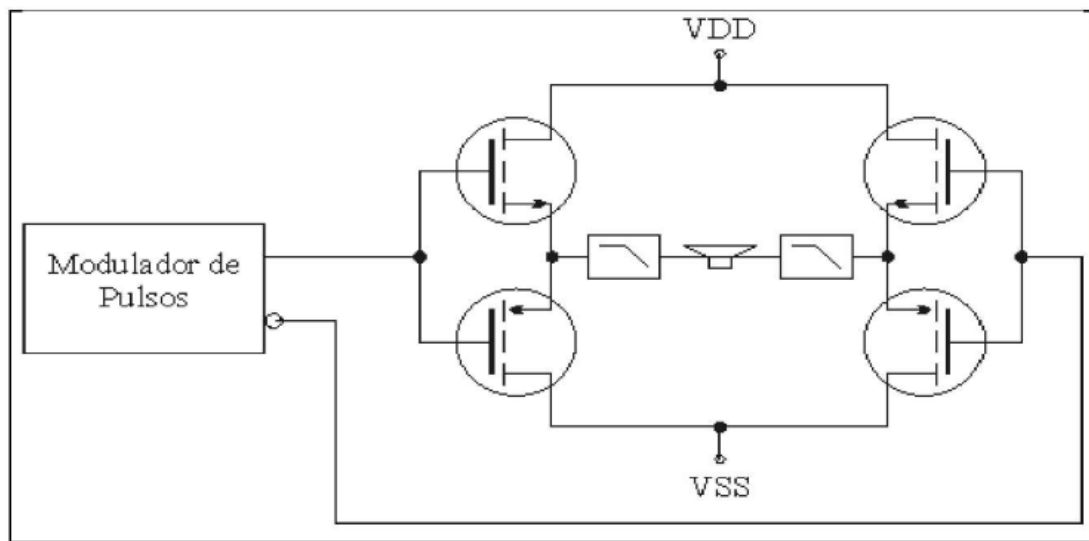
*Comparación entre un filtro LC de:
2° orden (izquierda) y 4° orden (derecha)*

En la figura se ve que cuando se utiliza un filtro de 2° orden hay más ondulaciones, pero menos cambios de fase y si se trabaja con uno de 4° orden hay menos ondulaciones, pero más cambio de fase.

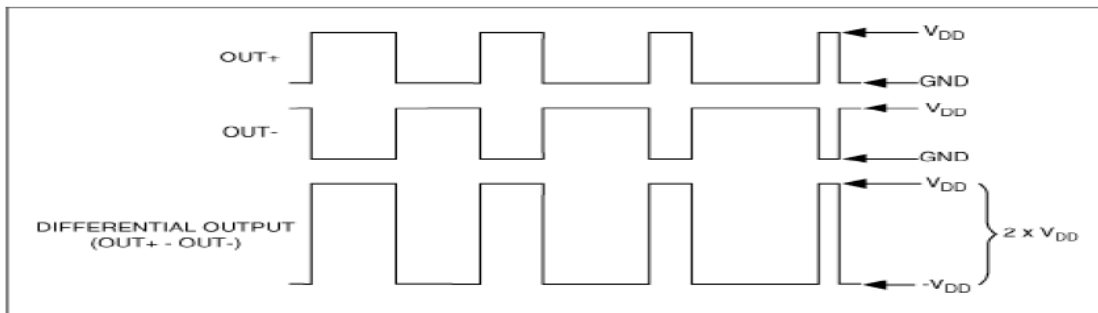
2) Full bridge o Bridge tied Load (BTL):



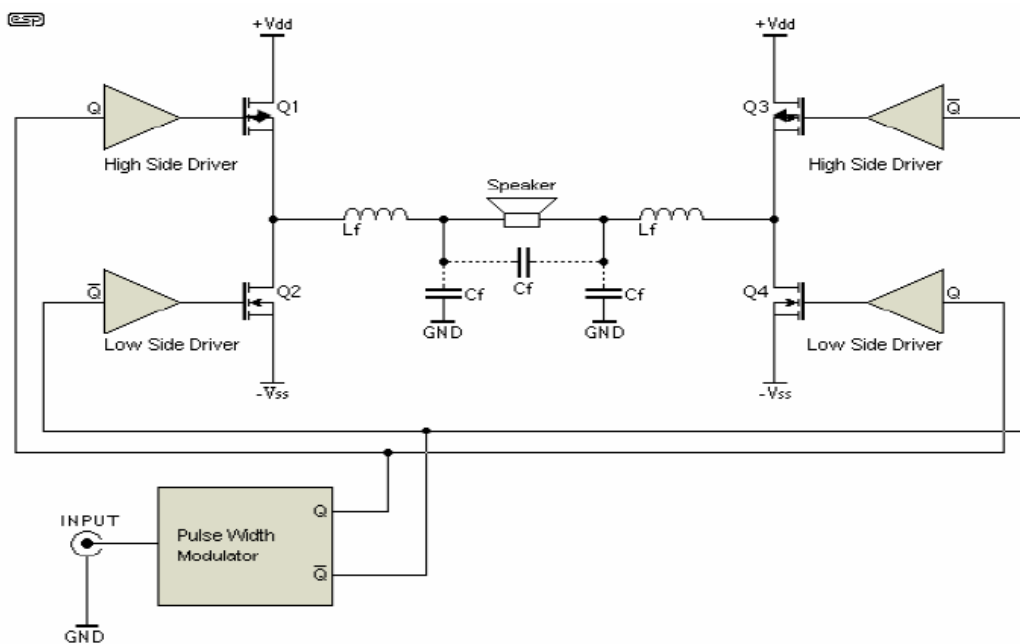
Como se muestra en la figura está formado por dos etapas Half bridge (SE). Esto permite que la corriente fluya bidireccionalmente a través del altavoz sin la necesidad de una alimentación negativa ni de condensadores de bloqueo de DC.



En la siguiente figura veremos que las formas de onda de salida de un puente completo (con señal PWM) son complementarias entre sí.



Y el circuito básico sera:



Al igual que con la topología de medio puente, necesita dos filtros LC para obtener la señal de audio amplificada en la salida y evitar que la alta frecuencia se disipe en la carga.

Ventajas de los amplificadores BTL sobre los SE:

- 1) El medio puente es más simple y más flexible, pero el puente completo (para la misma potencia), utiliza dispositivos de salida para la mitad del valor de tensión.
- 1) Un medio puente requiere condensadores de bloqueo de DC en la salida, pues los cambios entre V_{DD} y tierra, producen un ciclo de trabajo del 50% y un desplazamiento de DC de $V_{DD} / 2$. En un puente completo este desplazamiento es cero porque aparecen a cada lado de la carga y se compensan.

2) Con la misma tensión de alimentación, el BTL puede cuadruplicar la potencia de salida de un amplificador SE. La desventaja del BTL es que la carga no está referida a masa, por lo que no siempre es posible utilizar la conexión bridge.

Bibliografía:

- Garcerá, G. y otros: “Convertidores conmutados: Circuitos de potencia y control”, vol.1. Valencia, Servicios de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, 1998.
- Woodward, G. W. AM Transmitters. Sección 3.1 en Engineering Handbook, 8th Ed. National Association of Broadcasters. Washington, D. C. 1992.
- Malvino. Principios de Electrónica, Quinta Edición, Mac Graw Hill, 1998.
- *es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_Clase_D*
- *www.clubse.com.ar/newsletter/news17/notas/nota08.html*
- *Solid State Radio Engineering - Krauss. Bostian, Raab - 1980*

Ing. Hugo Aparicio