

# FUENTES CONMUTADAS

---

## INTRODUCCION

Remontándonos un poco en la historia describiremos que en la industria no se contaba con equipos eléctricos, luego se empezaron a introducir dispositivos eléctricos no muy sofisticados por lo que no eran muy sensibles a sobretensiones, luego llegaron los equipos más modernos que necesitaban de bajos voltajes por lo que se inició la construcción de fuentes de alimentación que proporcionaran el voltaje suficiente de estos dispositivos. La tecnología avanzó, claro mejores equipos para la industria y el hogar pero esto contribuyó a que los dispositivos electrónicos fueran más sensibles a sobretensiones por lo que se tubo que diseñar fuentes reguladas que garanticen el voltaje necesario para el buen funcionamiento de estos dispositivos.

Las fuentes conmutadas fueron desarrolladas inicialmente para aplicaciones militares y aeroespaciales en los años 60, por ser inaceptable el peso y volumen de las lineales, se han desarrollado desde entonces diversas topologías y circuitos de control,

## FUENTES CONMUTADAS

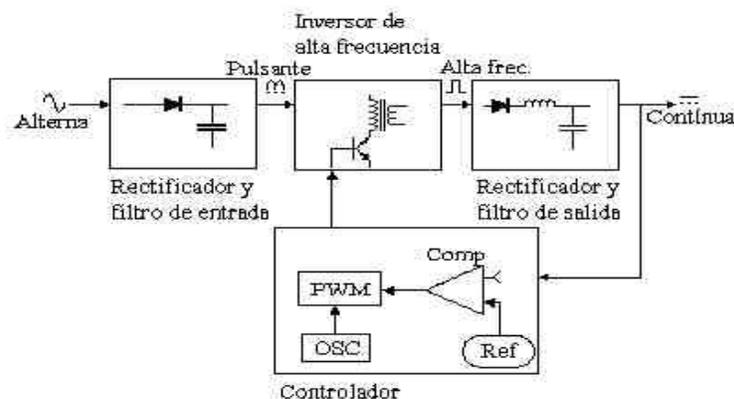
---

Una fuente conmutada es un dispositivo electrónico que transforma energía eléctrica mediante transistores en conmutación. Mientras que un regulador de tensión utiliza transistores polarizados en su región activa de amplificación, las fuentes conmutadas utilizan los mismos conmutándolos activamente a altas frecuencias (20-100 Kilociclos típicamente) entre corte (abierto) y saturación (Cerrados). La forma de onda cuadrada resultante es aplicada a transformadores con núcleo de ferrita (Los núcleos de hierro no son adecuados para estas altas frecuencias) para obtener uno o varios voltajes de salida de corriente alterna (CA) que luego son rectificadas (Con diodos rápidos) y filtradas (Inductores y condensadores) para obtener los voltajes de salida de corriente continua (CC). Las ventajas de este método incluyen menor tamaño y peso del núcleo, mayor eficiencia por lo tanto menor calentamiento. Las desventajas comparándolas con fuentes lineales es que son más complejas y generan ruido eléctrico de alta frecuencia que debe ser cuidadosamente minimizado para no causar interferencias a equipos próximos a estas fuentes.

*Las fuentes conmutadas pueden ser clasificadas en cuatro tipos:*

- alimentación CA, salida CC: rectificador, conmutador, transformador, rectificador de salida, filtro.  
(Ej.: fuente de alimentación de ordenador de mesa)
- alimentación CA, salida CA: Variador de frecuencia, conversor de Frecuencia.  
(Ej., variador de motor)
- alimentación CC, salida CA: Inversor  
(Ej.: generar 220v/50ciclos a partir de una batería de 12v)
- alimentación CC, salida CC: conversor de voltaje o de corriente.  
(Ej.: cargador de baterías de celulares para auto)

Las fuentes conmutadas son de circuitos relativamente complejos, pero podemos siempre diferenciar cuatro bloques constructivos básicos:

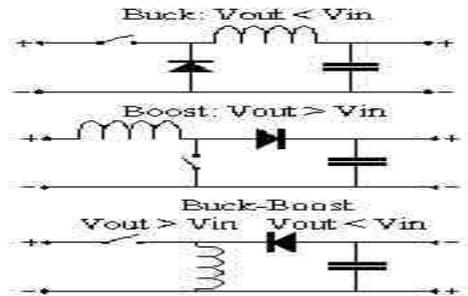


En el primer bloque rectificamos y filtramos la tensión alterna de entrada convirtiéndola en una continua pulsante. El segundo bloque se encarga de convertir esa continua en una onda cuadrada de alta frecuencia (10 a 200 kHz.), La cual es aplicada a una bobina o al primario de un transformador. Luego el segundo bloque rectifica y filtra la salida de alta frecuencia del bloque anterior, entregando así una continua pura.

El cuarto bloque se encarga de comandar la oscilación del segundo bloque. Este bloque consiste de un oscilador de frecuencia fija, una tensión de referencia, un comparador de tensión y un modulador de ancho de pulso (PWM). El modulador recibe el pulso del oscilador y modifica su ciclo de trabajo según la señal del comparador, el cual coteja la tensión continua de salida del tercer bloque con la tensión de referencia. Aclaración: ciclo de trabajo es la relación entre el estado de encendido y el estado de apagado de una onda cuadrada.

En la mayoría de los circuitos de fuentes conmutadas encontraremos el primer y el cuarto bloque como elementos invariables, en cambio el cuarto y en segundo tendrán diferentes tipos de configuraciones. A veces el cuarto bloque será hecho con integrados y otras veces nos encontraremos con circuitos totalmente transistorizados.

El segundo bloque es realmente el alma de la fuente y tendrá configuraciones básicas: BUCK, BOOST, BUCK-BOOST.



**Buck:** el circuito interrumpe la alimentación y provee una onda cuadrada de ancho de pulso variable a un simple filtro LC. La tensión aproximada es  $V_{out} = V_{in} \cdot \text{ciclo de trabajo}$  y la regulación se ejecuta mediante la simple variación del ciclo de trabajo. En la mayoría de los casos esta regulación es suficiente y sólo se deberá ajustar levemente la relación de vueltas en el transformador para compensar las pérdidas por acción resistiva, la caída en los diodos y la tensión de saturación de los transistores de conmutación.

**Boost:** el funcionamiento es más complejo. Mientras el Buck almacena la energía en una bobina y éste entrega la energía almacenada más la tensión de alimentación a la carga.

**Buck-Boost:** los sistemas conocidos como Flyback son una evolución de los sistemas anteriores y la diferencia fundamental es que éste entrada a la carga sólo la energía almacenada en la inductancia. El verdadero sistema Boost sólo puede regular siendo  $V_{out}$  mayor que  $V_{in}$ , mientras que el Flyback puede regular siendo menor o mayor la tensión de salida que la de entrada.

En el análisis de los sistemas Boost comenzamos por saber que la energía que se almacena en la inductancia es entregada como una cantidad fija de potencia a la carga:  $P_o = (L I^2 f_o) / 2$ ;  $I$  es la corriente de pico en la bobina,  $f_o$  es la frecuencia de trabajo,  $L$  es el valor de la inductancia. Este sistema entrega siempre una cantidad fija de potencia a la carga sin fijarse en la impedancia de la carga, por eso es que el Boost es muy usado en sistemas de flash fotográficos o en sistemas de ignición del automotor para recargar la carga capacitiva, también es usado como un muy buen cargador de baterías. Pero cuando necesitamos alimentar un sistema electrónico con carga resistiva debemos conocer muy bien el valor de resistencia para poder calcular el valor de la tensión de salida:  $V_o = (P_o \cdot R_I)^{1/2} = I (1/2 L f_o R_I)^{1/2}$ , donde  $R_I$  es el valor de resistencia del circuito. En este caso la corriente de la bobina es proporcional al tiempo de conectado o al ciclo de trabajo del conmutador y la regulación para cargas fijas se realiza por variación del ciclo de trabajo.

*Las fuentes conmutadas existen en diferentes topologías con características particulares en cada una.*

Topología	Potencia (W)	Eficiencia (típica)	Costo relativo	Tensiones (V)	Aislamiento	Almacenaje de energía	Relación de tensión	Características
2 Buck	0–1000	75%	1.0	5–1000*	No	Inductor Simple	V salida < V entrada	Disminuir Tensión
Boost	0–150	78%	1.0	5–600*	No	Inductor Simple	V salida > V entrada	Aumentar Tensión
Buck-boost	0–150	78%	1.0	5–600*	No	Inductor Simple	V salida mayor o menor que V entrada	Permite invertir la salida
Flyback	0–150	78%	1.0	5–600	Si	Transformador	V salida mayor o menor que V entrada	Salidas Múltiples
Half-Forward	0–250	75%	1.2	5-500	Si	Transformador + inductor		
Forward					Si	Transformador +		Salidas Múltiples

						inductor		
<u>Push-Pull</u>	100 – 100 0	72%	1.75	50– 1000	Si			
<u>Semipuente Half-bridge</u>	0– 500	72%	1.9	50– 1000	Si			
<u>Puente H completo</u>	400 – 200 0	69%	>2.0	50– 1000	Si			
Resonante, conmutada en cruce por cero	>10 00		>2.0					
<u>Ćuk</u>					No	Condensador + dos inductores		-
<u>SEPIC</u>					No	Dos inductores	V salida mayor o menor que V entrada	
<u>Multiplicador de tensión</u>	0.1- 1	90%	0.2	500- 100000	No	Condensador	V salida > V entrada	Los multiplicadores de tensión se utilizan para generar muy altas tensiones.

### *Las fuentes conmutadas tienen las siguientes ventajas:*

- La eficiencia de las fuentes conmutadas está comprendida entre el 68 y el 90%. Esto hace reducir el costo de los dispositivos de potencia. Además, los dispositivos de potencia funcionan en el régimen de corte y saturación, haciendo el uso más eficiente de un dispositivo de potencia.
- Debido a que la tensión de entrada es conmutada en un forma de alterna y ubicada en un elemento magnético, se puede variar la relación de transformación pudiendo funcionar como reductor, elevador, o inversor de tensión con múltiples salidas.
- No es necesario el uso del transformador de línea, ya que el elemento magnético de transferencia de energía lo puede reemplazar, funcionando no en 50/60 Hz, sino en alta frecuencia de conmutación, reduciendo el tamaño del transformador y en consecuencia, de la fuente; reduciendo el peso, y el coste.

Un transformador de energía de 50/60 Hz tiene un volumen efectivo significativamente mayor que uno aplicado en una fuente conmutada, cuya frecuencia es típicamente mayor que 15 kHz.

La desventaja de las fuentes conmutadas es su diseño más elaborado. Un diseño de una fuente conmutada puede llevar varias semanas o meses de desarrollo y puesta a punto, dependiendo de los requerimientos.

### *CONFIGURACIONES BÁSICAS RECOMENDADAS*

Las configuraciones más recomendadas por los fabricantes se diferencian en potencia, modo, precio, utilidad y calidad. Son muy comunes las siguientes configuraciones:

#### CIRCUITO - POTENCIA

- Convertidores DC (Buck) - 5 Watts
- Flyback - 50 Watts
- Forward (Boost) - 100 Watts
- Half-Bridge - 200 Watts
- Full-Bridge - 500 Watts

#### FLYBACK Y FORWARD (BOOST):

- Rango desde 50 hasta 250 vatios.
- Variación del voltaje de entrada:  $V_{in} +10\%$ ,  $-20\%$
- Eficiencia del convertidor:  $\eta = 80\%$
- Regulación por variación del ciclo de trabajo:  $d(\max) = 0.4$

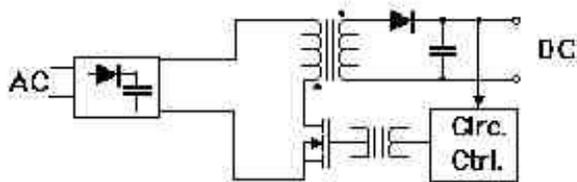
- Máx. corriente de trabajo en el transistor:

$$I_w = 2 P_{out} / (h d(\max) V_{in}(\min) 1.41) = 5.5 P_{out} / V_{in} \text{ (FLYBACK)}$$

$$I_w = P_{out} / (h d(\max) V_{in}(\min) 1.41) = 2.25 P_{out} / V_{in} \text{ (FORWARD)}$$

- Máx. tensión de trabajo del transistor:  $V_w = 2 V_{in}(\max) 1.41 + \text{tensión de protección}$

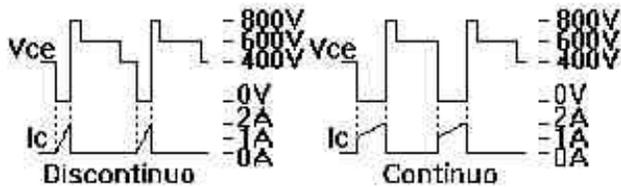
Configuración básica:



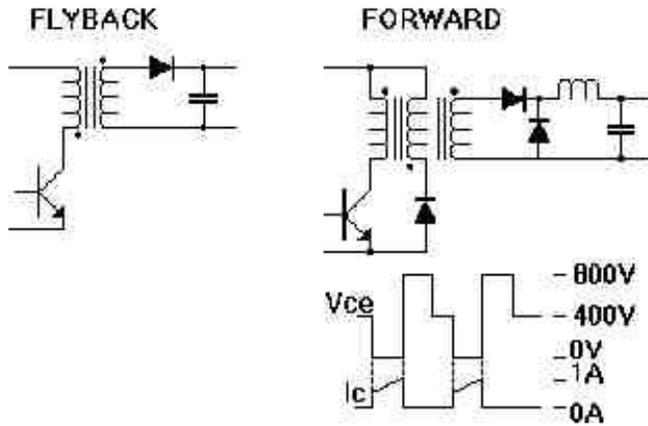
En el regulador flyback se puede variar sutilmente el modo de trabajo, continuo o discontinuo.

Modo Discontinuo: es el modo Boost estrictamente, donde la energía se vacía completamente del inductor antes de que el transistor vuelva a encenderse.

Modo Continuo: antes que la bobina se vacíe enciende nuevamente el transistor. La ventaja de este modo radica en que el transistor sólo necesita conmutar la mitad de un gran pico de corriente para entregar la misma potencia a la carga.



El regulador Forward difiere del Flyback en que agrega un diodo más para ser usado como diodo de libre rodado en el filtro LC y un devanado más en el transformador para lograr el reestablecimiento. Gracias a todo esto puede entregar potencia a la carga mientras el transistor está encendido. El ciclo de trabajo no puede superar el 50%.



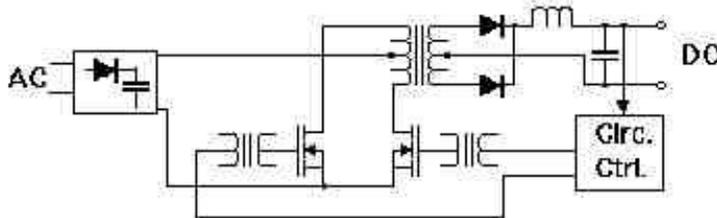
### PUSH-PULL:

- Rango desde 100 hasta 500 vatios.
- Variación del voltaje de entrada:  $V_{in} +10\%$ ,  $-20\%$
- Eficiencia del convertidor:  $\eta = 80\%$
- Regulación por variación del ciclo de trabajo:  $d(\max) = 0.8$
- Máx. corriente de trabajo en el transistor:

$$I_w = P_{out} / ( \eta d(\max) V_{in}(\min) 1.41 ) = 1.4 P_{out} / V_{in} \text{ (FORWARD)}$$

- Máx. tensión de trabajo del transistor:  $V_w = 2 V_{in}(\max) 1.41 + \text{tensión de protección}$

Configuración básica:



### HALF-BRIDGE:

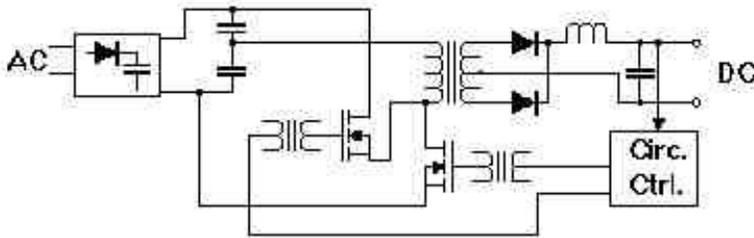
- Rango desde 100 hasta 500 vatios.
- Variación del voltaje de entrada:  $V_{in} +10\%$ ,  $-20\%$
- Eficiencia del convertidor:  $\eta = 80\%$
- Regulación por variación del ciclo de trabajo:  $d(\max) = 0.8$

- Máx. corriente de trabajo en el transistor:

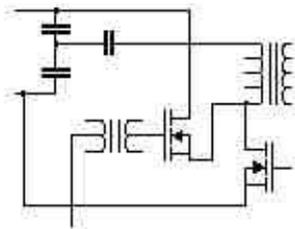
$$I_w = 2 P_{out} / ( h d(\max) V_{in}(\min) 1.41 ) = 2.8 P_{out} / V_{in} \text{ (FORWARD)}$$

- Máx. tensión de trabajo del transistor:  $V_w = V_{in}(\max) 1.41 + \text{tensión de protección}$

Configuración básica:



Opcionalmente agregando un capacitor de acoplamiento:



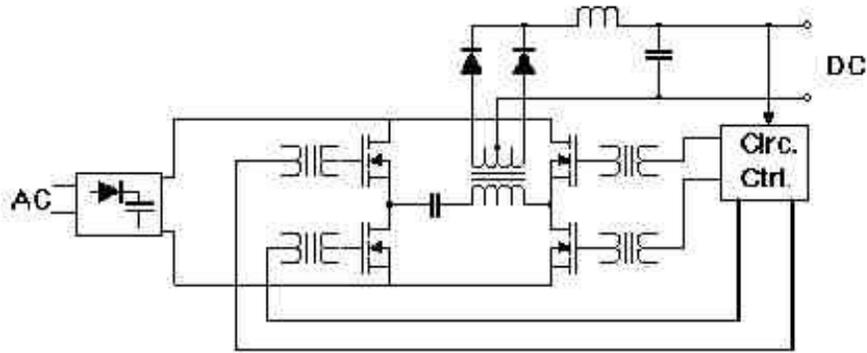
FULL-BRIDGE:

- Rango desde 500 hasta 1000 vatios.
- Variación del voltaje de entrada:  $V_{in} +10\%, -20\%$
- Eficiencia del convertidor:  $\eta = 80\%$
- Regulación por variación del ciclo de trabajo:  $d(\max) = 0.8$
- Máx. corriente de trabajo en el transistor:

$$I_w = P_{out} / ( h d(\max) V_{in}(\min) 1.41 ) = 1.4 P_{out} / V_{in} \text{ (FORWARD)}$$

- Máx. tensión de trabajo del transistor:  $V_w = V_{in}(\max) 1.41 + \text{tensión de protección}$

Configuración básica:



*Tipos de fuentes conmutadas*

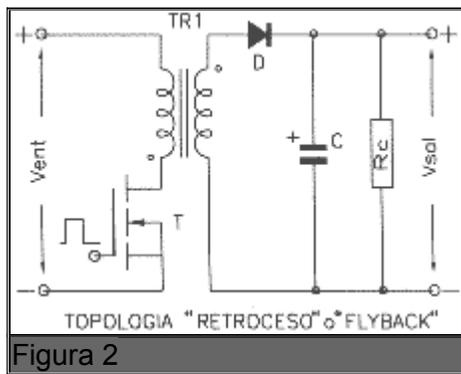


Figura 2

De retroceso (Flyback)

Dada su sencillez y bajo costo, es la topología preferida en la mayoría de los convertidores de baja potencia (hasta 100 w).

En la Fig.2 se muestran los principios de esta topología de fuente conmutada. Cuando «T» conduce, la corriente crece linealmente en el primario del transformador, diseñado con alta inductancia para almacenar energía a medida que el flujo magnético aumenta.

La disposición del devanado asegura que el diodo «D» está polarizado en sentido inverso durante este período, por lo que no circula corriente en el secundario. Cuando «T» se bloquea, el flujo en el transformador cesa generando una corriente inversa en el secundario que carga el condensador a través del diodo alimentando la carga. Es decir, en el campo magnético del transformador se almacena la energía durante el período «ON» del transistor y se transfiere a la carga durante el período «OFF» (FLYBACK). El condensador mantiene la tensión en la carga

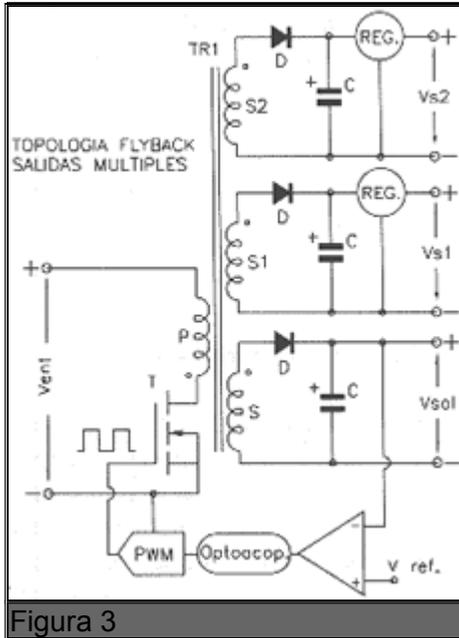


Figura 3

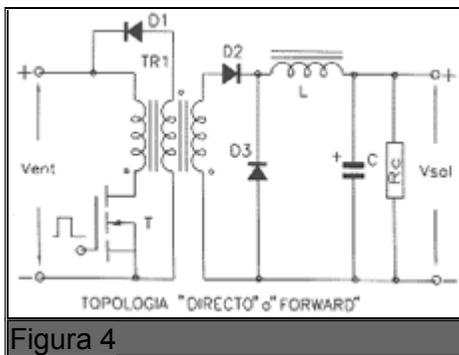


Figura 4

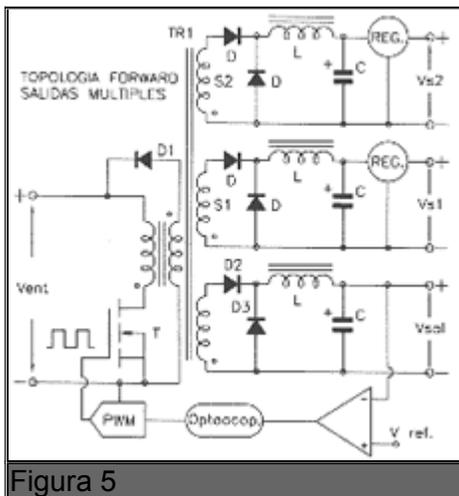


Figura 5

durante el período «ON».

La regulación de tensión en la salida se obtiene mediante comparación con una referencia fija, actuando sobre el tiempo «ON» del transistor, por tanto la energía transferida a la salida mantiene la tensión constante independientemente del valor de la carga o del valor de la tensión de entrada.

La variación del período «ON» se controla por modulación de ancho de pulso (PWM) a frecuencia fija, o en algunos sistemas más sencillos por autooscilación variando la frecuencia en función de la carga.

## 2.2 FLYBACK de salidas múltiples

La Fig.3 muestra la simplicidad con que pueden añadirse salidas aisladas a un convertidor Flyback. Los requisitos para cada salida adicional son un secundario auxiliar, un diodo rápido y un condensador. Para la regulación de las salidas auxiliares suele utilizarse un estabilizador lineal de tres terminales a costa de una pérdida en el rendimiento.

## 2.3 Directo (FORWARD)

Es algo más complejo que el sistema Flyback aunque razonablemente sencillo y rentable en cuanto a costes para potencias de 100 a 250w. Cuando el transistor conmutador «T» está conduciendo «ON», la corriente crece en el primario del transformador transfiriendo energía al secundario. Como quiera que el sentido de los devanados el diodo D2 está polarizado directamente, la corriente pasa a través de la inductancia L a la carga, acumulándose energía magnética en L. Cuando «T» se apaga «OFF», la corriente en el primario cesa invirtiendo la tensión en el secundario. En este momento D2 queda polarizado inversamente bloqueando la corriente de secundario, pero D3 conduce permitiendo que la energía almacenada en L se descargue alimentando a la carga. El tercer devanado, llamado de recuperación, permite aprovechar la energía que queda en el transformador durante el ciclo «OFF» devolviéndola a la entrada, vía D1.

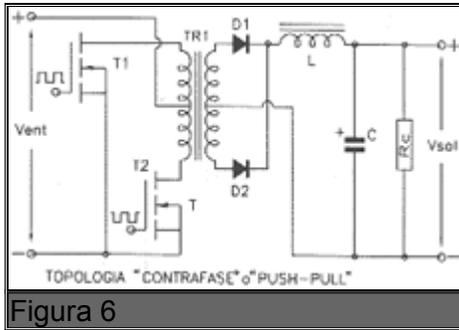


Figura 6

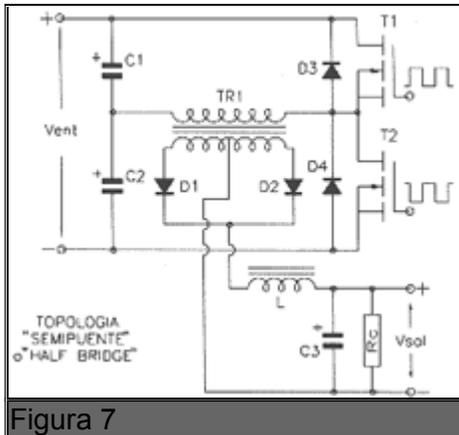


Figura 7

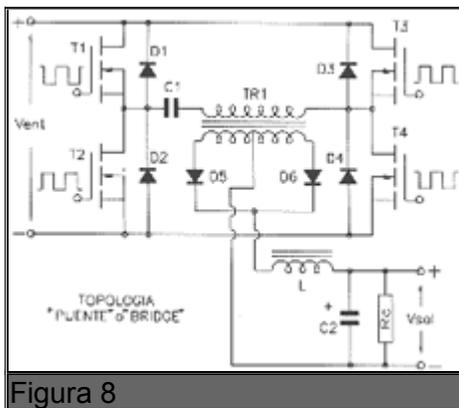


Figura 8

Contrariamente al método Flyback, la inductancia cede energía a la carga durante los periodos «ON» y «OFF», esto hace que los diodos soporten la mitad de la corriente y los niveles de rizado de salida sean más bajos.

#### 2.4 FORWARD de salidas múltiples

Por cada salida adicional es necesario un secundario auxiliar, dos diodos rápidos, una inductancia y un condensador de filtro. Esto hace que sea más costoso que el Flyback.

Para mejorar la regulación en las salidas auxiliares se utilizan estabilizadores lineales.

#### 2.5 Contrafase (PUSH-PULL)

Esta topología se desarrolló para aprovechar mejor los núcleos magnéticos. En esencia consisten en dos convertidores Forward controlados por dos entradas en contrafase. Los diodos D1 y D2 en el secundario, actúan como dos diodos de recuperación. Idealmente los periodos de conducción de los transistores deben ser iguales, el transformador se excita simétricamente y al contrario de la topología Forward no es preciso prever entrehierro en el circuito magnético, ya que no existe asimetría en el flujo magnético y por tanto componente continua. Ello se traduce en una reducción del volumen del núcleo del orden del 50% para una misma potencia.

Una precaución que debe tenerse en cuenta en este tipo de circuitos es que las características de conmutación de los transistores deben ser muy similares, y los devanados tanto en primario como en secundario han de ser perfectamente simétricos, incluso en su disposición física en el núcleo.

También se ha de tener en cuenta, que los transistores conmutadores soportan en estado «OFF» una tensión doble de la tensión de entrada.

#### 2.6 Semipunte

Es la topología más utilizada para tensiones de entrada altas (de 200 a 400v) y para potencias de hasta 2000w. En la Fig.7 se

aprecia que el primario del transformador está conectado entre la unión central de los condensadores del desacoplo de entrada y la unión de la fuente de T1 y el drenador de T2. Si se dispara alternativamente los transistores T1 y T2 conecta el extremo del primario a +300v y a 0v según corresponda, generando una onda cuadrada de 155v de valor máximo, la cual con una adecuada relación de espiras, rectificadas y filtradas se obtiene la tensión de salida deseada.

Una ventaja de este sistema es que los transistores soportan como máximo la tensión de entrada cuando están en «OFF», mientras que en los sistemas Flyback, Push-Pull y Forward, esta tensión es cuando menos el doble. Ello permite, cuando la tensión de entrada es la red rectificadas, la utilización de transistores de 400 a 500v, mientras que en las otras configuraciones se requerirían transistores de 800 a 1000v. La regulación se logra comparando una muestra de la salida con una tensión de referencia para controlar el ancho del estado de conducción de los transistores.

Algunas de las ventajas del semipunto son:  
Núcleos más pequeños.  
Baja dispersión de flujo magnético.  
La frecuencia en los filtros de salida es el doble de la frecuencia de conmutación.  
Filtro de reducidas dimensiones.  
Bajo ruido y rizado de salida.  
Fácil configuración como salidas múltiples.  
Ruido radiado relativamente bajo.  
La mayor desventaja consiste en que el primario del transformador trabaja a la mitad de la tensión de entrada y por tanto circula el doble de corriente por los transistores que en el caso de topología puente que se verá a continuación.

## 2.7 Puente (Bridge)

Para potencias superiores a 2000w, las corrientes en los transistores de conmutación son excesivas. La Fig. 8 muestra la topología básica de un convertidor puente, donde los transistores en ramas opuestas del puente T1 y T4 son disparados en fase y T2 y T4 en

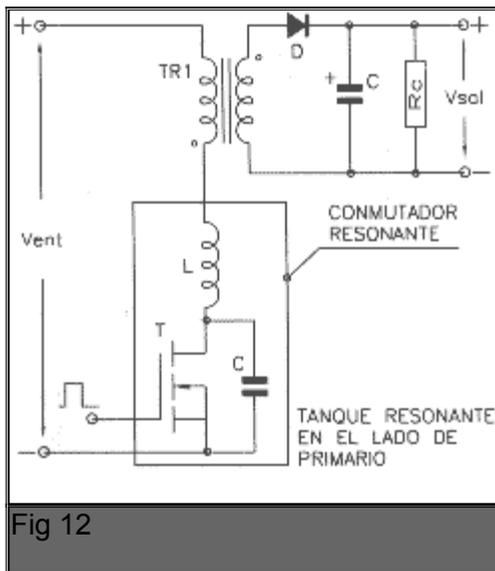


Un control regulado solo en tensión es un sistema de tercer orden que requiere compensación para limitar la ganancia del bucle a altas frecuencias por lo que las prestaciones dinámicas son pobres con tendencia a oscilaciones cuando están sometidos a transitorios importantes.

Con el complemento del control en modo corriente, el bucle abierto se convierte en un sistema de primer orden, facilitando la estabilización y el control. Al mismo tiempo se reduce el problema de las Interferencias Electro Magnéticas (EMI) al evitarse las oscilaciones que se generan en condiciones transitorias.

El control en modo corriente es de fácil aplicación en tipologías Flyback y Forward pero caso complejo en sistemas Push-Pull, Puente y Semipuente, en especial si se requiere disponer de salidas múltiples.

### Fuentes Resonantes



Para mejorar la relación Potencia/Volumen de los equipos, se han incrementado las frecuencias de conmutación. Por encima de los 100KHz las pérdidas en la conmutación así como las interferencias electromagnéticas suponen problemas difíciles de resolver a un coste razonable. Los problemas e inconvenientes en las conmutaciones se reducen considerablemente usando técnicas resonantes.

Las dos características más destacables en esta topología son:

Conmutación a paso por cero de corriente, o sea, sin pérdidas en la conmutación.

La forma de onda de corriente es senoidal, es decir, menor fatiga de los componentes y eliminación del EMI en banda ancha.

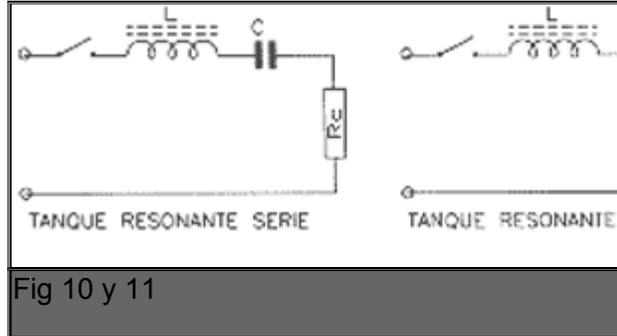


Fig 10 y 11

Cuando el procedimiento se combina con control PWM a frecuencia constante el sistema se denomina «Cuasi-resonante», aunque la mayoría de los diseños regulan fijando los tiempos ON-OFF del conmutador y modulando en frecuencia.

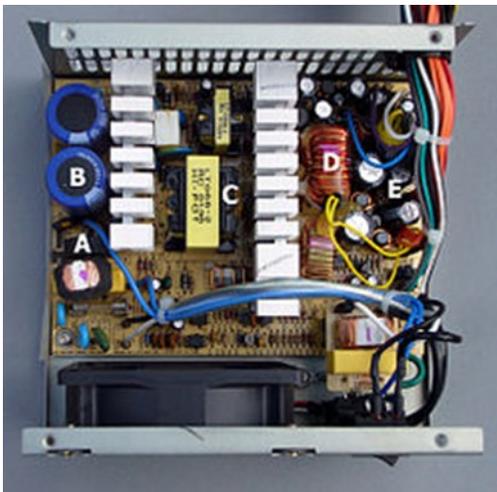
Como puede apreciarse en las Fig.10 y 11, existen dos topologías fundamentales: Serie y Paralelo. La combinación R-C es conocida como tanque resonante y puede estar en el primario o en el secundario del transformador.

En la Fig.12 el tanque resonante está colocado en el primario que es lo más común.

Las ventajas de las técnicas resonantes comienzan a partir de 200KHz hasta 2 MHz. Es una desventaja a la hora de fijar salidas múltiples.

Un buen compromiso es la topología cuasi-resonante configurada como semipunto controlando el tanque L-C en el primario. Permite salidas múltiples conservando las ventajas de la conmutación de corriente a paso por cero, la onda senoidal y operar a alta frecuencia.

## IMÁGENES DE FUENTES CONMUTADAS



Vista por dentro de una fuente conmutada [ATX](#).

A - Puente rectificador

B - [Condensador](#) de entrada

C - Transformador

D - Bobina del filtro de Salida

E - Condensadores del filtro de Salida

Para mas tutoriales <https://practicasdeelectronica3.blogspot.com>

Para ver el video completo <https://youtu.be/Tqhh2-jZkWg>