



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD

ELECTRÓNICA DE POTENCIA

M.C. JORGE ALFREDO HUERTA BALCÁZAR  
2019

# CONTENIDO DE LA MATERIA.

## I DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

- 1.1 Semiconductores de Potencia.
- 1.2 SCR.
- 1.3 TRIAC.
- 1.4 DIAC.
- 1.5 GTO.
- 1.6 IGBT.

## III CONVERTIDORES

- 3.1 Control de Convertidores.
- 3.2 Convertidor Reductor.
- 3.3 Convertidor Elevador.
- 3.4 Convertidor Reductor-Elevador.
- 3.5 Convertidor de Puente Completo.

## V FUENTES DE ALIMENTACION DE C.C.

- 5.1 Fuentes de Alimentación Lineales.
- 5.2 Convertidores de Aislamiento Eléctrico.
- 5.3 Control de Fuentes de Alimentación de Modo Conmutado.
- 5.4 Protección de Fuentes de Alimentación.

## II RECTIFICADORES

- 2.1 Conceptos Básicos de Rectificadores.
- 2.2 Rectificadores no Controlados.
  - 2.2.1 Monofásicos.
  - 2.2.2 Trifásicos.
- 2.3 Rectificadores Controlados.
  - 2.3.1 Circuitos de Tiristores.
  - 2.3.2 Convertidores Monofásicos.
  - 2.3.3 Convertidores Trifásicos.
  - 2.3.4 Otros Convertidores Trifásicos

## IV INVERSORES

- 4.1 Inversores de Modo Conmutado.
- 4.2 Inversores Monofásicos.
- 4.3 Inversores Trifásicos.
- 4.4 Inversores PWM y SPWM

## VI APLICACIONES DE ACCIONAMIENTO DE MOTORES

- 6.1 Motores de C.D.
- 6.2 Motores de Inducción.
- 6.3 Motores Síncronos.

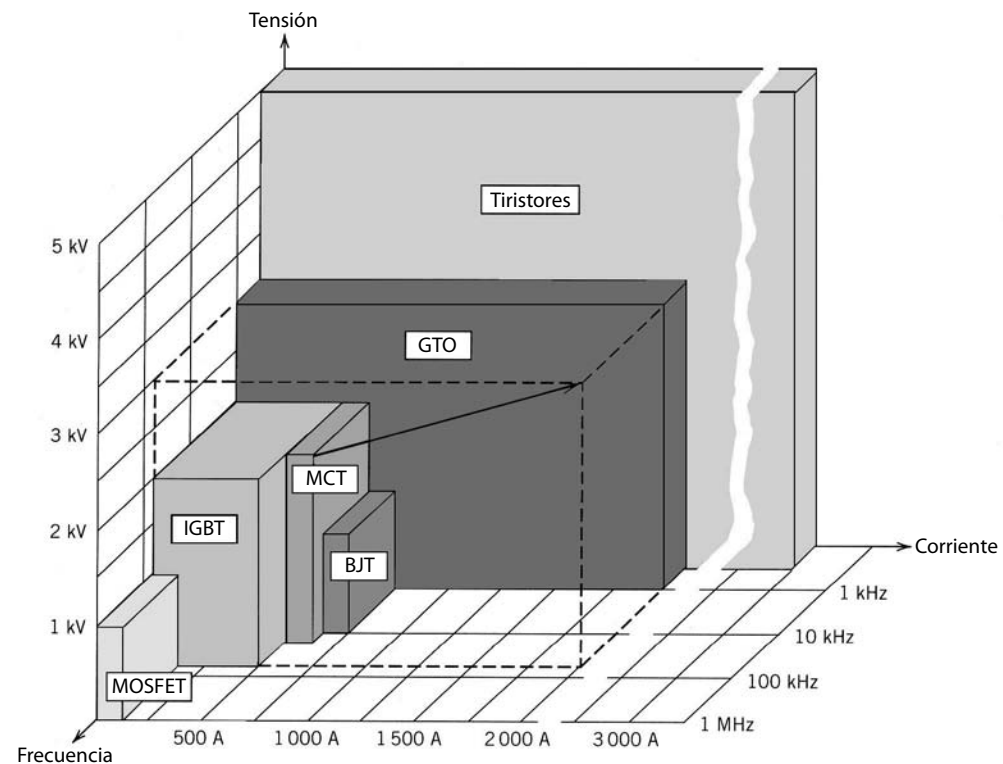
## VII SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA

- 7.1 Transmisión de C.C. en alto Voltaje.
- 7.2 Compensadores Estáticos de VAR.
- 7.3 Interconexión de Fuentes de Energía Renovables y Sistemas de Almacenamiento de Energía al Sistema de Suministro.
- 7.4 Filtros Activos.

## I DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

Mohan, Electrónica de Potencia, Capítulo 2 (Panorama General de los Interruptores de Semiconductores de Potencia)

- 1.1 Semiconductores de Potencia.
- 1.2 SCR.
- 1.3 TRIAC.
- 1.4 DIAC.
- 1.5 GTO.
- 1.6 IGBT.



## Electrónica de Potencia

Tiene la tarea de procesar y controlar el flujo de energía eléctrica mediante el suministro de voltajes y corrientes en una forma optima para las cargas de los usuarios.

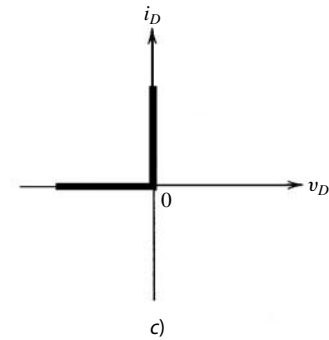
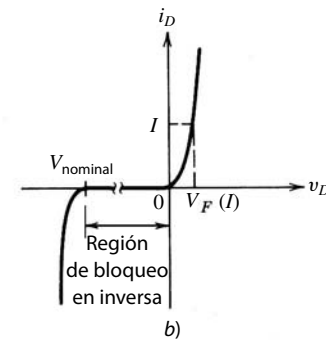
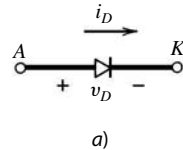
Los circuitos electrónicos de potencia funcionan utilizando dispositivos semiconductores como interruptores, para controlar o modificar tensión o la corriente.

Características del interruptor de material semiconductor:

- Tienen dos estados.
  - On (activado o conducción) Podría verse como en un corto circuito.
  - Off (desactivado) Podría verse como circuito abierto.
- Bajas perdidas de potencia en el dispositivo.
  - Durante la conducción.
  - Durante la conmutación.

### • DIODO

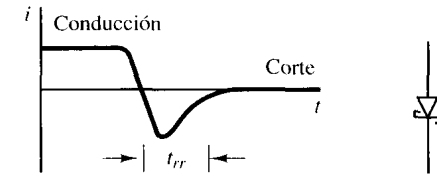
- Interruptor Electrónico mas sencillo
- No se puede controlar
- Polarización directa (conducción)
- Polarización inversa (corte)



## Tipos de Diodos

### *Diodo Schottky*

Se utilizan donde se requiere una caída baja de voltaje en directa (0.3v) en circuitos de tensión de salida muy baja. Su capacidad es de 50-100v



### *Diodo de Recuperación rápida*

Se utilizan en circuitos de alta frecuencia donde se requiere un tiempo muy corto de recuperación inversa.

### *Diodo de frecuencia de línea.*

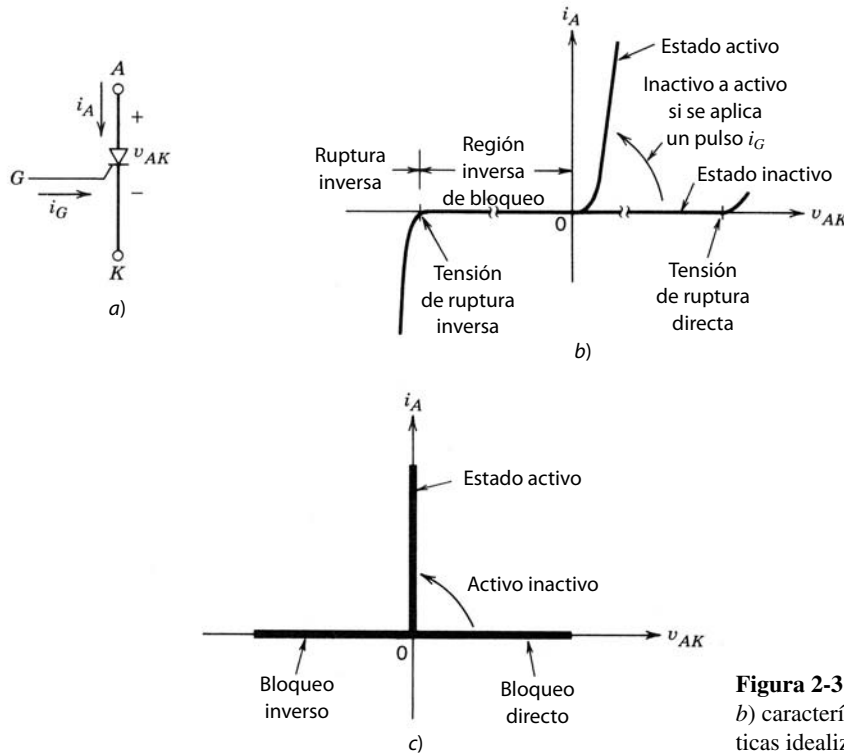
Se utilizan en aplicaciones donde se requiere voltajes de encendido muy pequeños, poca velocidad de recuperación pero grandes valores de voltaje y/o corriente.

## • TIRISTORES

Los transistores son utilizados como interruptores en los circuitos electrónicos de potencia donde es necesario controlar la activación del interruptor. La familia de este tipo de dispositivos electrónicos se caracteriza por tener tres terminales. Entre los dispositivos están el SCR (Rectificador Controlado de Silicio), el TRIAC (Triodo de Corriente Alterna), el GTO (Tiristor de Bloqueo por Puerta), el MCT (Tiristor controlado por MOS (Metal-Oxido-Semiconductor)). Todos ellos se caracterizan por soportar altas corrientes y altas tensiones de bloqueo en aplicaciones de alta potencia, pero son “lentos” ya que sus frecuencias límite de operación están entre los 10 y 20 kHz.

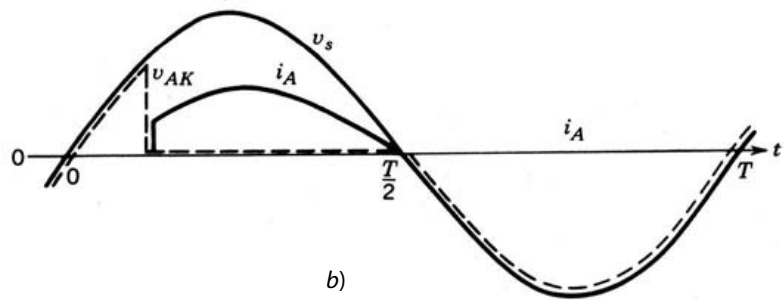
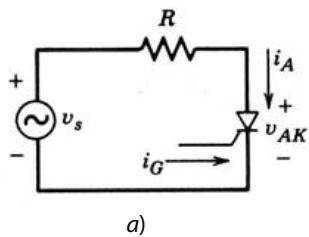
- **SCR (Rectificador Controlado de Silicio).**

- Para que un SCR entre en operación es necesario aplicar una corriente de puerta cuando la tensión ánodo cátodo sea positiva.
- Ya que entra en conducción la corriente en la puerta deja de ser necesaria.
- Continuará en conducción mientras la corriente de ánodo siga siendo positiva y este por sobre un nivel que se denomina corriente de mantenimiento.



Características de los Tiristores

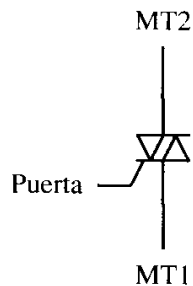
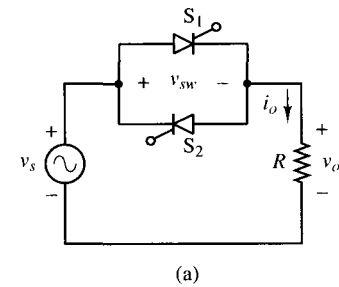
Figura 2-3  
b) características idealizadas



Circuito de Tiristor.

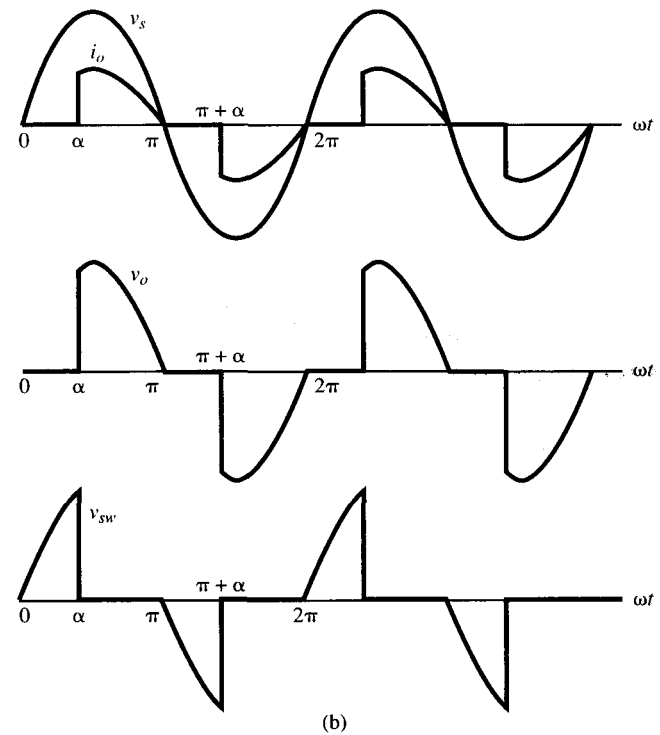
• **TRIAC (Triodo de Alternating Current)**

Un Triac es un par de SCR en antiparalelo o paralelo inverso, porque conducen la corriente en ambos sentidos.



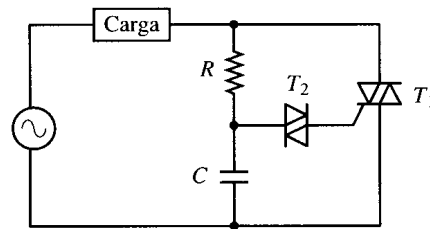
Simbolo

Circuito equivalente del TRIAC y Formas de onda



- **DIAC (Diodo de Alternating Current)**

Los DIAC son miembros de la familia de los tiristores que funcionan como un TRIAC auto-disparado. Son utilizados en sistemas de disparo de TRIACs donde el ángulo de disparo se controla con arreglos R-C y son elegidos en base a su valor de voltaje de operación (conducción) que normalmente oscila alrededor de los 30v, que cuando alcanzan este valor entran en operación y pueden alimentar la compuerta del TRIAC o algún otro tipo de tiristor.



R-C simple.

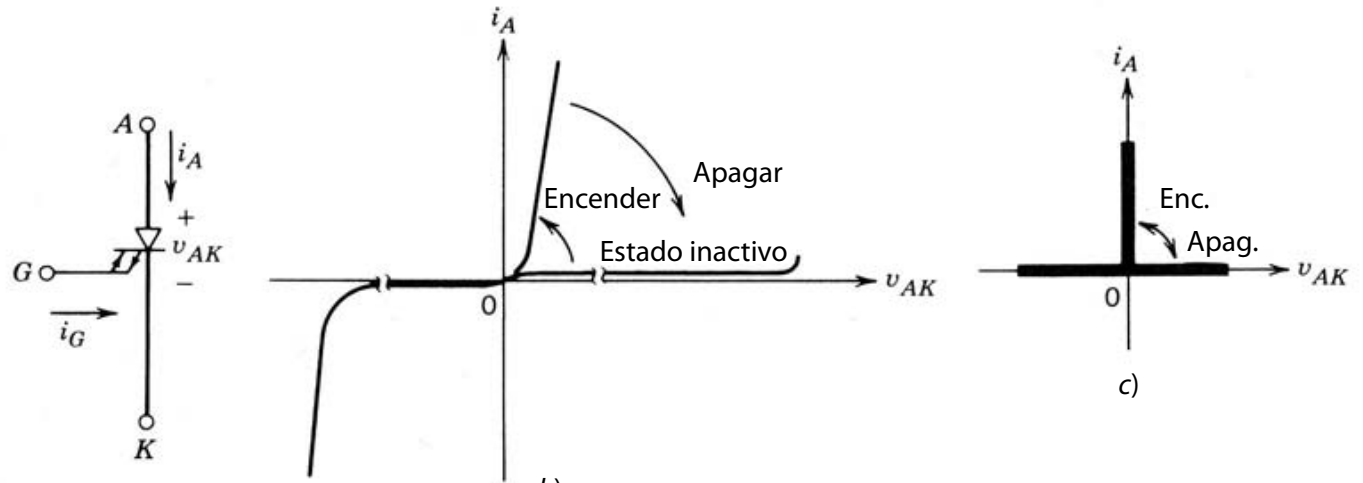
Circuito de Excitación

- **GTO (Tiristor de Bloqueo por Puerta)**

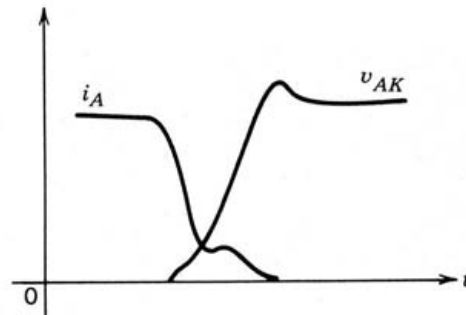
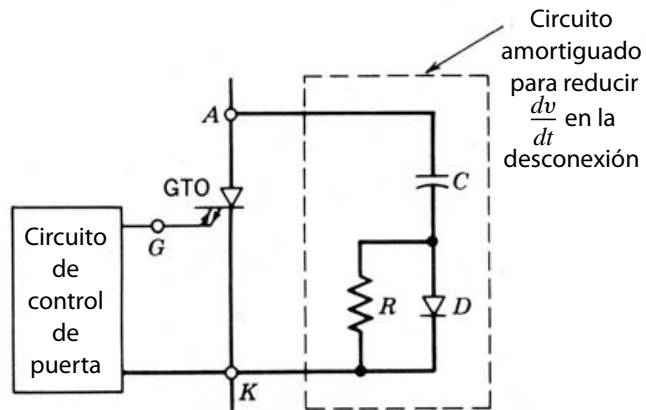
El GTO al igual que el SCR, se activa al aplicar una corriente de puerta de corta duración cuando la tensión ánodo-cátodo es positiva. Sin embargo la diferencia entre los dos radica en que él GTO puede desactivarse al aplicar una corriente de puerta negativa. El GTO es apropiado para algunas aplicaciones en que es necesario controlar tanto la activación como la desactivación del interruptor. La corriente negativa puede ser muy breve (milisegundos) pero la magnitud es muy grande en comparación con la corriente de activación, generalmente es de 1/3 de la corriente ánodo en conducción. Las características I-V son las mismas que se presentaron para el SCR.



Símbolo y características I-V del GTO

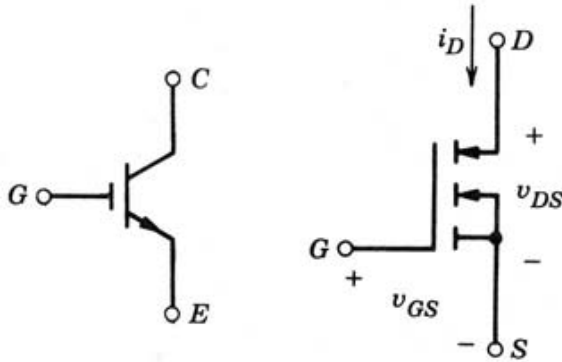


El voltaje en estado activo es poco mas alto que en otros interruptores (2-3v), tiene la capacidad de manejar hasta 4.5KV y 1-2kA en frecuencias de 100Hz - 10KHz.

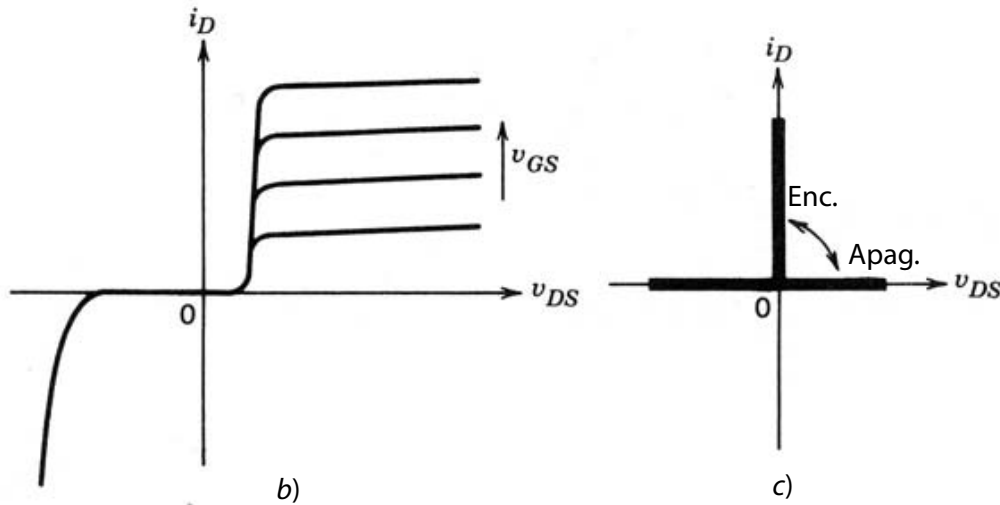


Aunque es posible desactivar el GTO este no soporta grandes variaciones de voltaje ( $\frac{dv}{dt}$ ) durante la desconexión, lo cual se presenta durante un apagado inductivo. Para ello se emplean circuitos que limiten (amortigüen) la  $\frac{dv}{dt}$  llamados circuitos Snubber.

- IGBT (Transistor Bipolar de Puerta Aislada).



a)



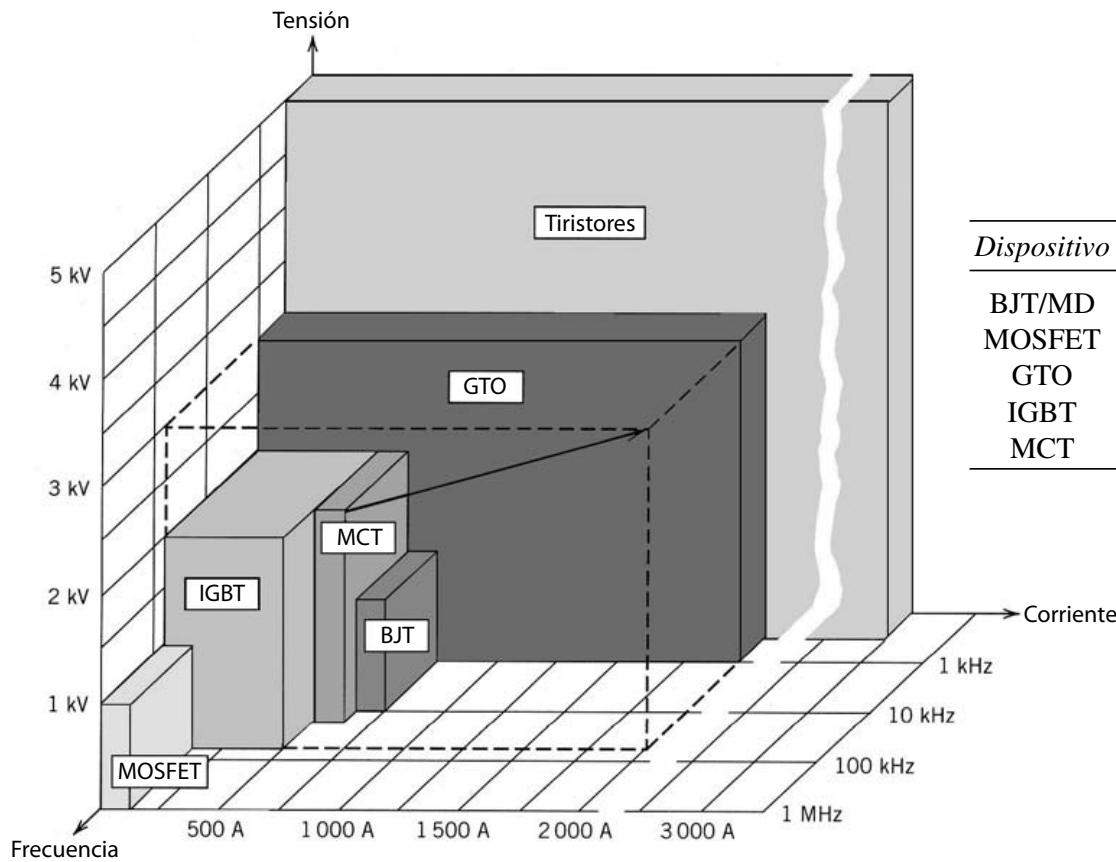
b)

c)

- Los IGBT tienen una puerta de alta impedancia que solo requiere una pequeña energía para conmutar el dispositivo.
- Tiene un voltaje de estado activo pequeño (2-3v) incluso en dispositivos con altos voltajes nominales de bloqueo de 1000v o más.
- Pueden ser diseñados para bloquear tensiones negativas, como se observa en la característica V-I idealizada.
- Es adecuado para velocidades de conmutación de hasta 20KHz

La selección de un dispositivo de potencia para una determinada aplicación no solo depende de los niveles de corriente y de tensión requeridos, sino también de sus características de conmutación. Los transistores y los GTO proporcionan control de activación y desactivación, los SCR proporcionan control de activación pero no de desactivación y los diodos y DIAC no ofrecen ninguno de los dos.

Las velocidades de conmutación y las pérdidas de potencia asociadas son dos factores muy importantes en los circuitos electrónicos de potencia. El MOSFET presenta ventajas en cuanto a velocidades de conmutación y tiene menores pérdidas por conmutación, pero es limitado en cuanto a capacidad del manejo de corriente y tensión en sus terminales.



<i>Dispositivo</i>	<i>Capacidad de potencia</i>	<i>Velocidad de conmutación</i>
BJT/MD	Media	Media
MOSFET	Baja	Rápida
GTO	Alta	Lenta
IGBT	Media	Media
MCT	Media	Media

## II RECTIFICADORES

2.1 Conceptos Básicos de Rectificadores.

2.2 Rectificadores no Controlados.

2.2.1 Monofásicos.

2.2.2 Trifásicos.

2.3 Rectificadores Controlados.

2.3.1 Circuitos de Tiristores.

2.3.2 Convertidores Monofásicos.

2.3.3 Convertidores Trifásicos.

2.3.4 Otros Convertidores Trifásicos

2.1 Conceptos básicos de rectificadores.

En la mayoría de las aplicaciones de electrónica de potencia, la entrada de energía se realiza en forma de onda de senoidal de corriente alterna (C.A.) a una frecuencia de 50 o 60Hz proveniente de la compañía suministradora de energía eléctrica. Por lo cual es necesario convertir esta señal senoidal a una señal de corriente continua (C.C.), comúnmente llamada corriente directa (C.D.), aunque realmente existen diferencias notables entre ellas.

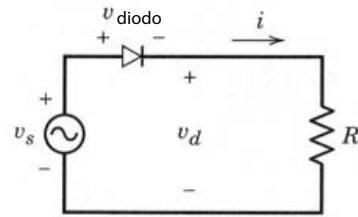
La forma más económica de convertir la C.A. en C.C. es utilizando arreglos de diodos, denominados “rectificadores”, estos arreglos al ser implementados en base a diodos no pueden ser controlados y pueden operar solo rectificando la forma de onda y no al contrario.

Un rectificador convierte la C.A. en C.C. La finalidad de un rectificador es generar una salida continua o proporcionar una onda de tensión o corriente que tenga un determinado componente continuo.

Dependiendo de la entrada de energía de corriente alterna con que se cuenta, qué puede ser monofásica, bifásica o trifásica, será la cantidad de potencia que se tenga disponible. De la magnitud de energía en C.C. requerida y de la calidad de la forma de onda en C.C. dependerá la elección de entre los distintos tipos de rectificadores, cada uno de ellos con distintos grados de complejidad.

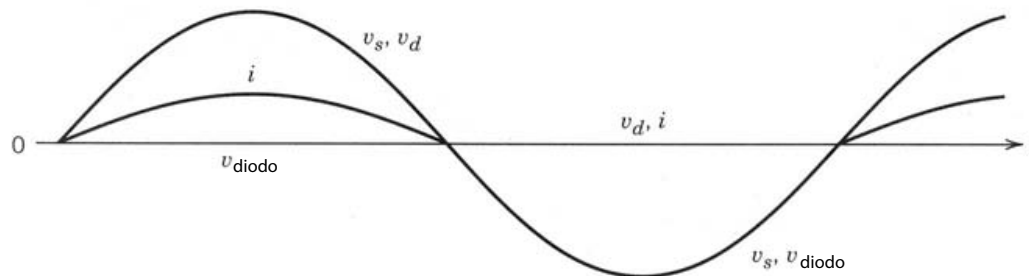
## Carga Resistiva

Los circuitos resistivos solo están conformados por dispositivos pasivos que convierten la energía en calor, luz o ambos. Estos elementos no crean desfaseamientos entre las forma de onda de voltaje y corriente.



a)

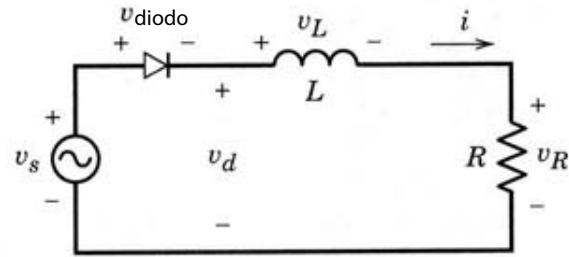
Circuito con carga Resistiva.



## Carga Inductiva.

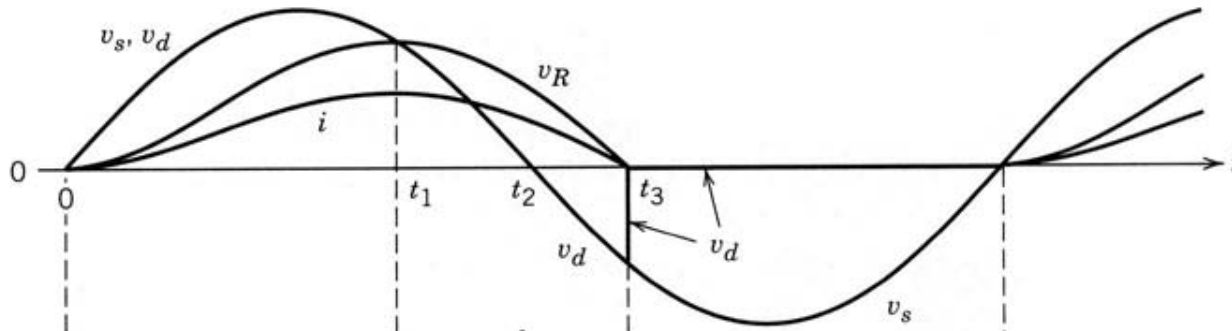
Este tipo de circuito está formado por elementos resistivos e inductivos, estos últimos se denominan como activos ya que son capaces de almacenar energía que toman del circuito y de liberarla en determinadas condiciones.

a)

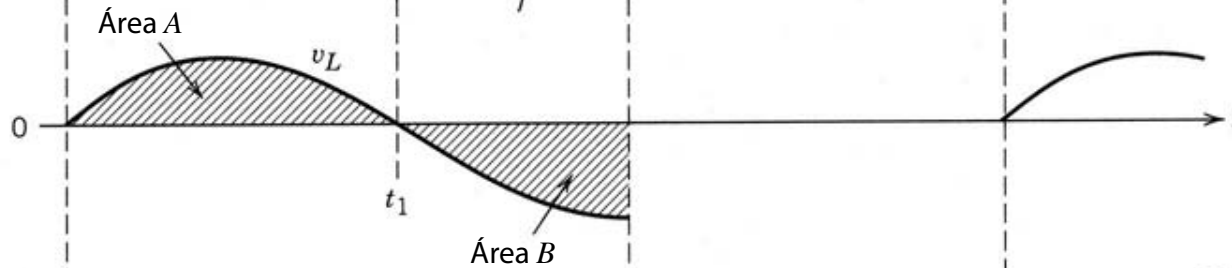


$$v_s = R_i + L \frac{di}{dt}$$

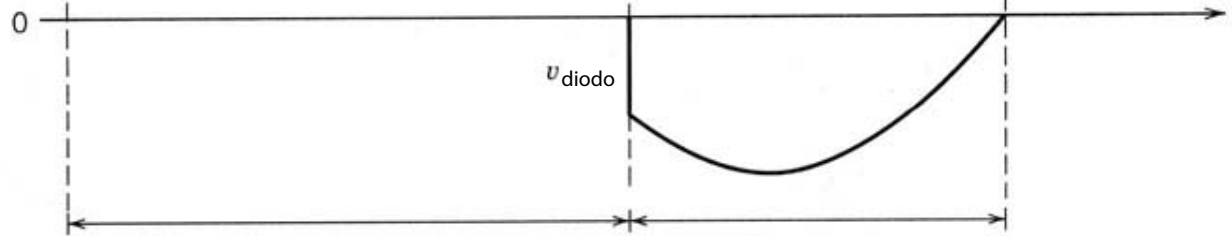
b)



c)

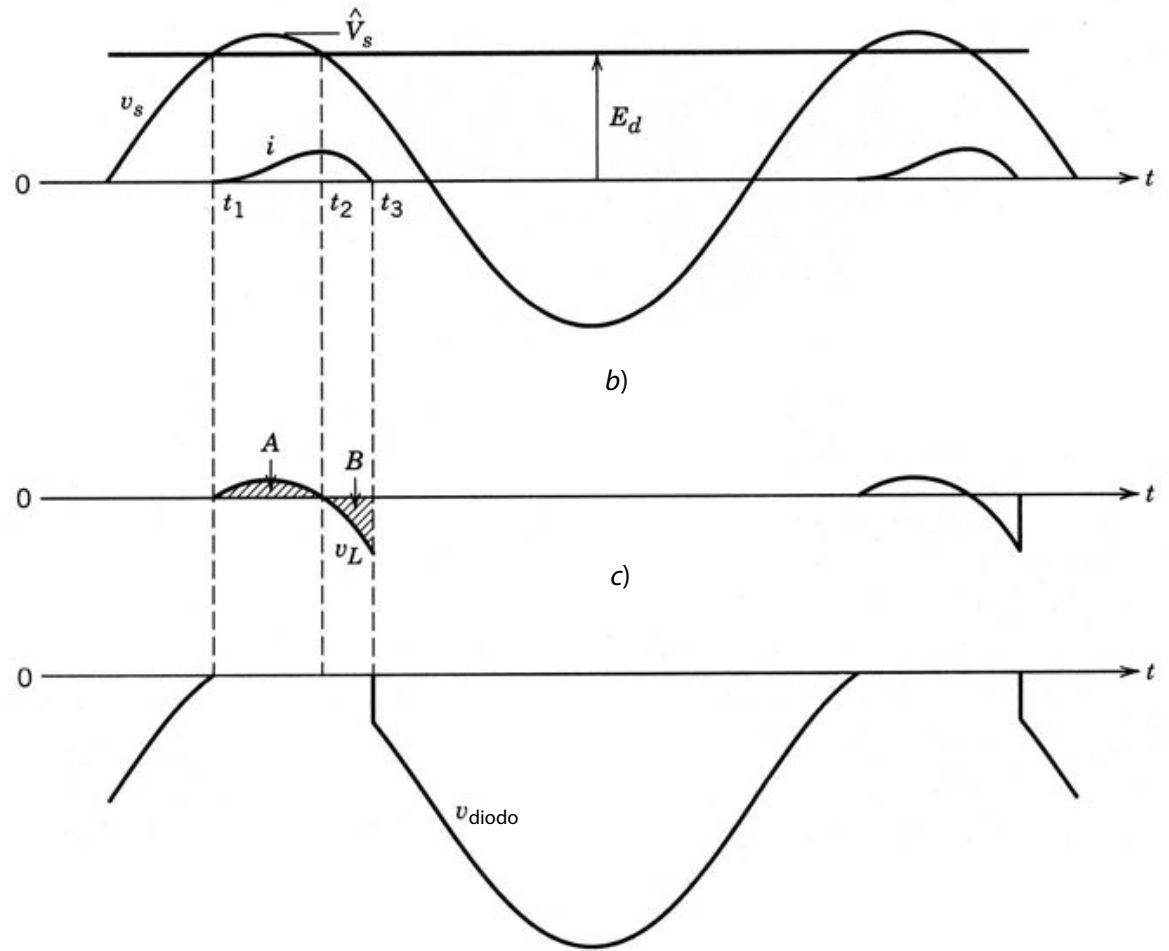
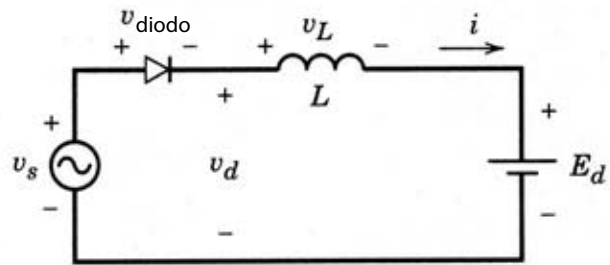


d)



Carga con un voltaje interno de C.C.

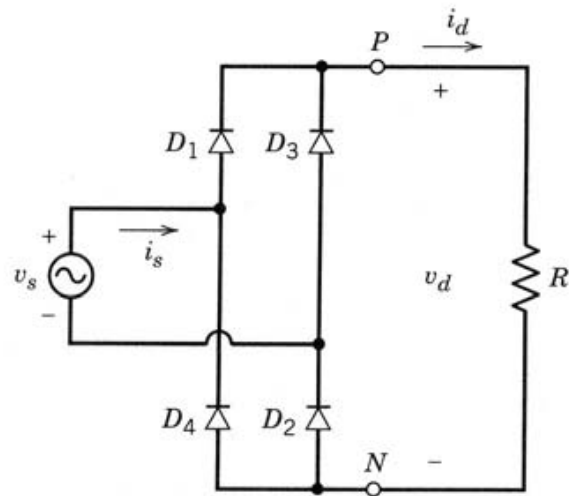
En este circuito la carga consiste de un inductor y un voltaje de C.C.



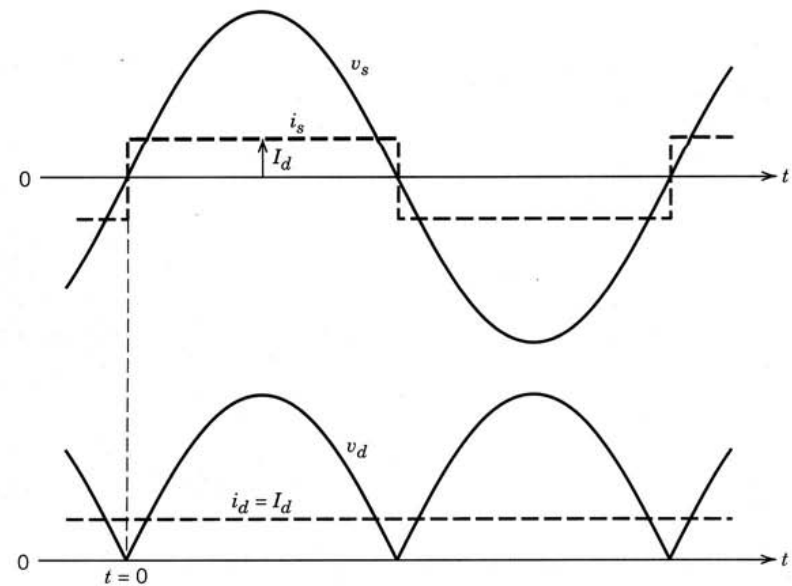
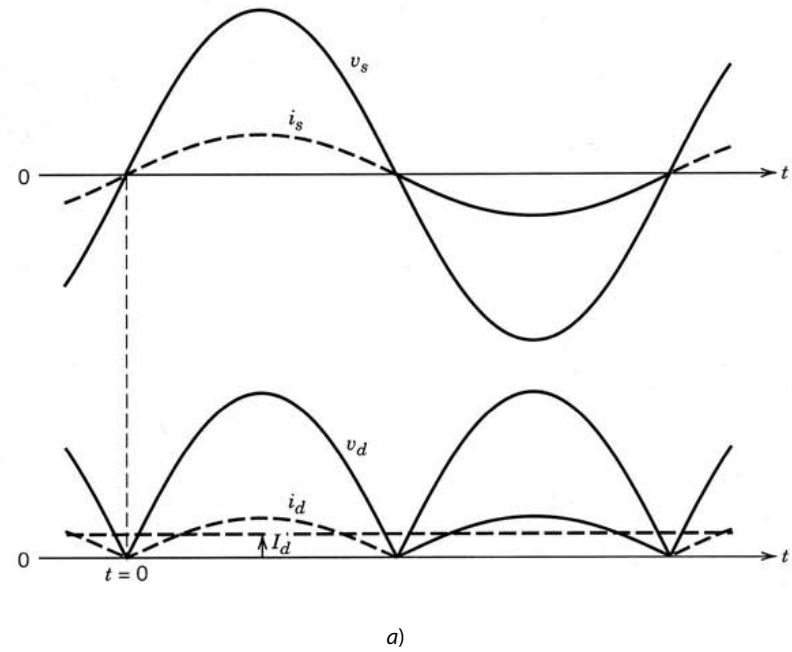
## 2.2 Rectificadores NO controlados.

### 2.2.1 Monofásicos

Rectificador Monofásico con de puente de diodos.

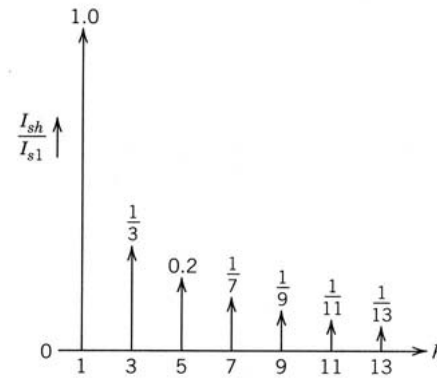
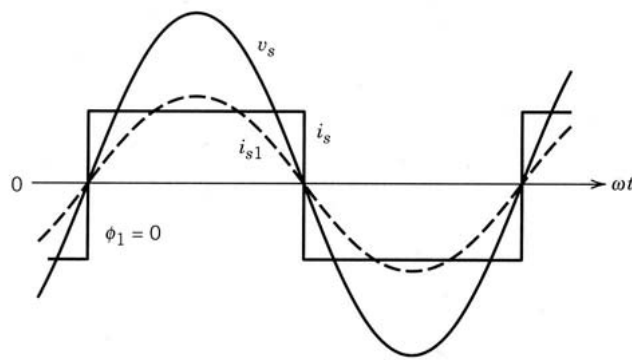


$$V_{do} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} V_s = 0.9 V_s$$



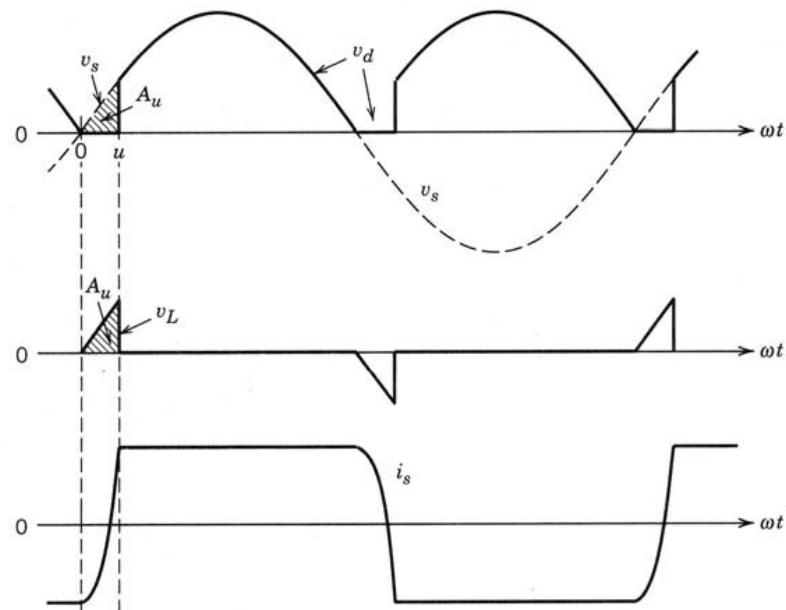
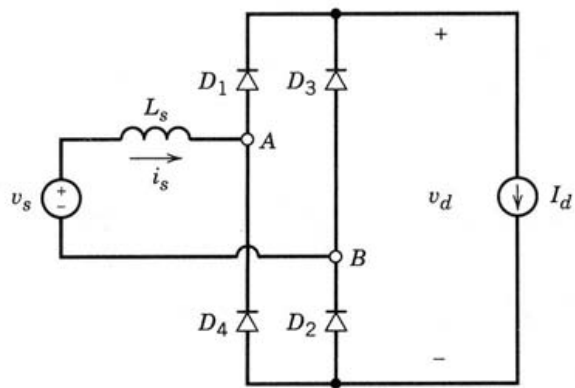


Distorsión armónica del rectificador monofásico de onda completa con carga R

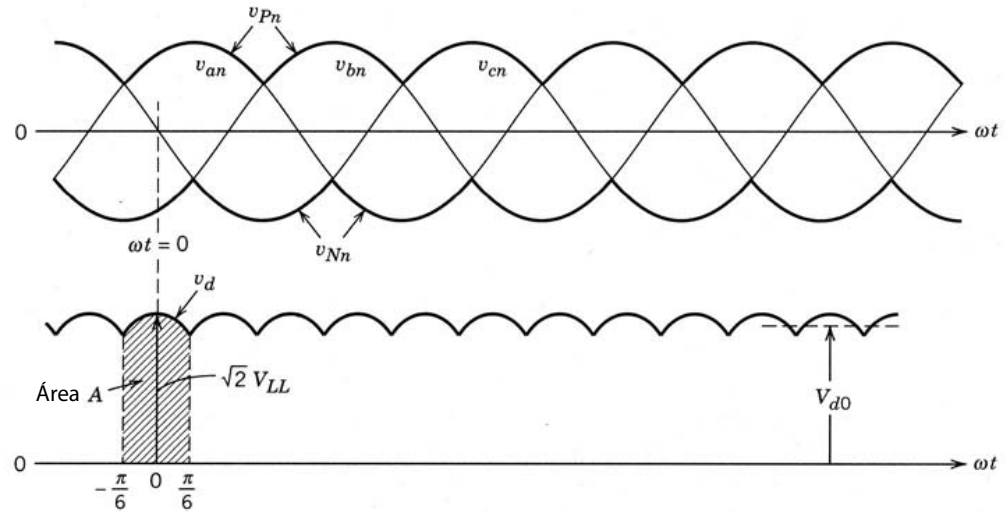
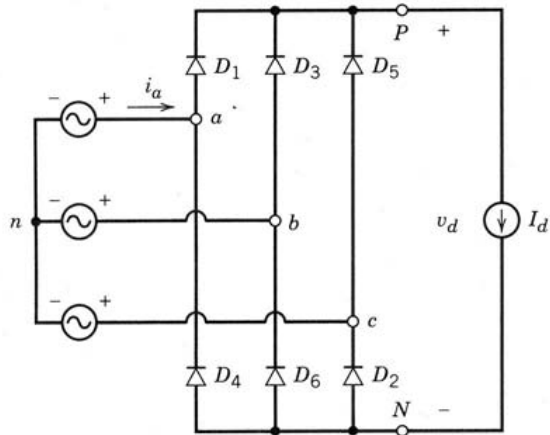


$THD = 48.43\%$

Efecto de  $L_s$  sobre la conmutación de la corriente.

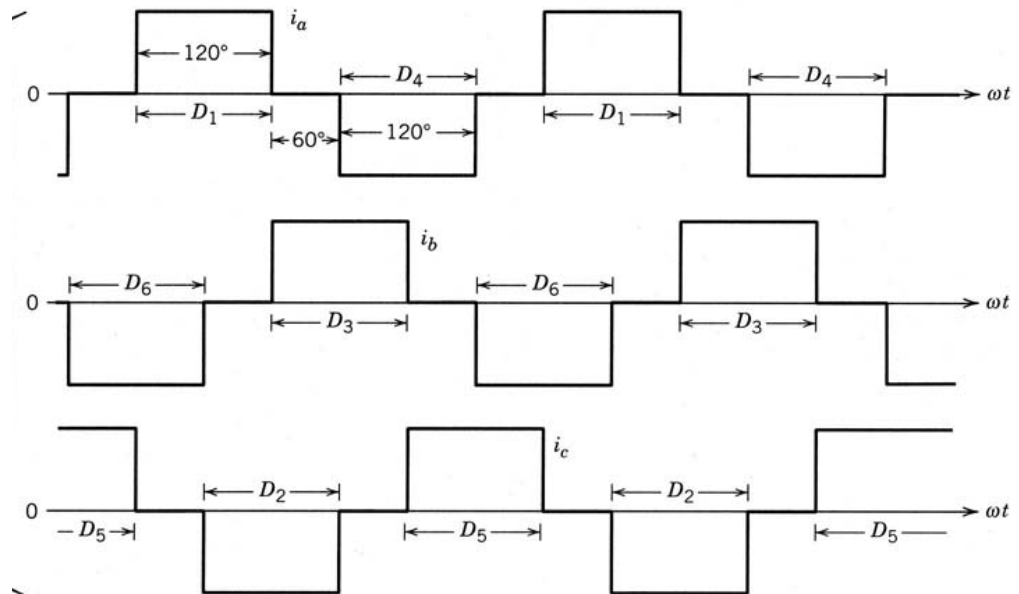


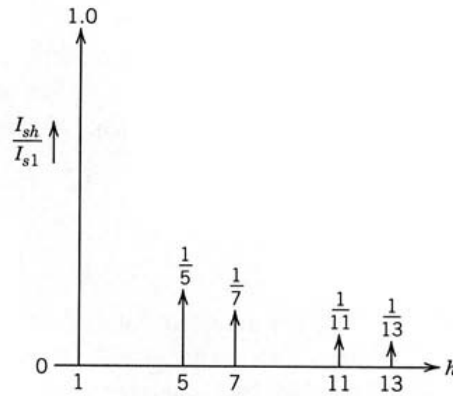
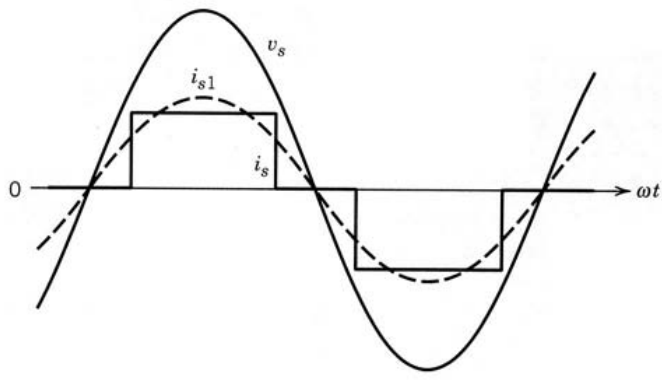
## 2.2.2 Rectificadores Trifásicos no controlados.



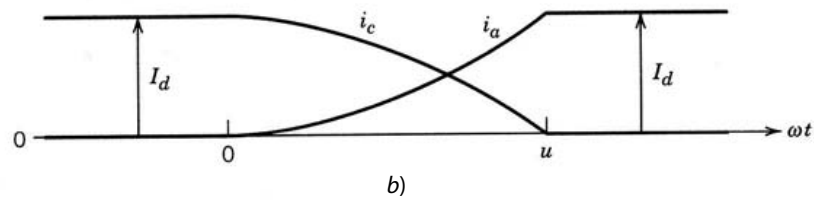
$$V_{do} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{LL} \cos \omega t \, d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}V_{LL} = 1.35V_{LL}$$

$$I_s = \sqrt{\frac{3}{2}} I_d = 0.816 I_d$$

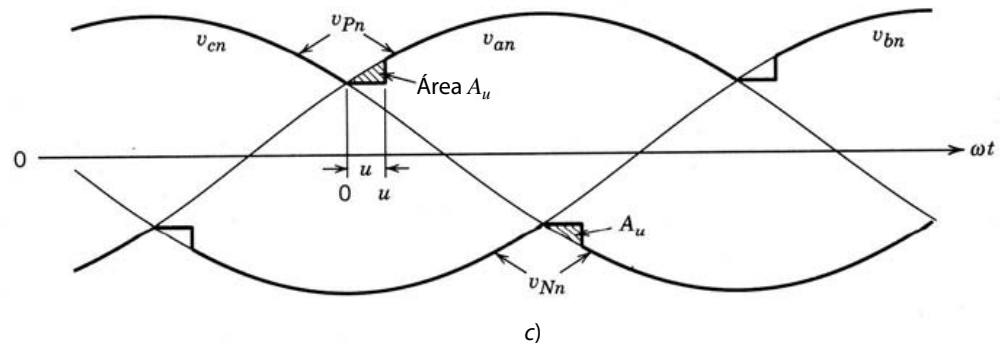




Ármonicos en la corriente de un convertidor trifásico de onda completa no controlado.



Efecto en la conmutación de  $L_s$  en los rectificadores trifásicos de onda completa no controlados



Tarea: Presentar un ensayo sobre los Rectificadores monofásicos y trifásicos no controlados.

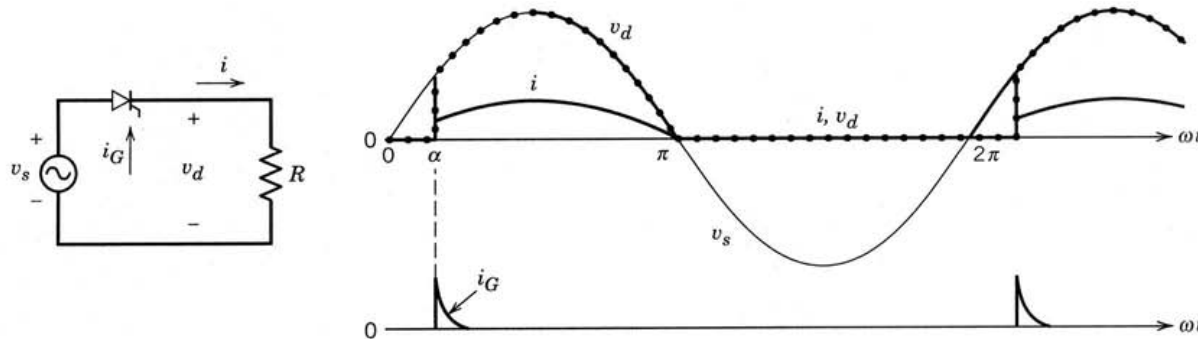
## 2.3 Rectificadores Controlados.

Para algunas de las aplicaciones de electrónica de potencia, como cargadores de batería, algunos tipos de accionamientos y controles de motores de corriente continua y de corriente alterna, excitatrices; es necesario que el voltaje en C.C. sea controlable. Para ello pueden ser utilizadas algunas de las configuraciones que se vieron anteriormente, pero con dispositivos que tengan la flexibilidad de controlar la salida del rectificador sustituyendo los diodos por conmutadores controlados, como por ejemplo un SCR.

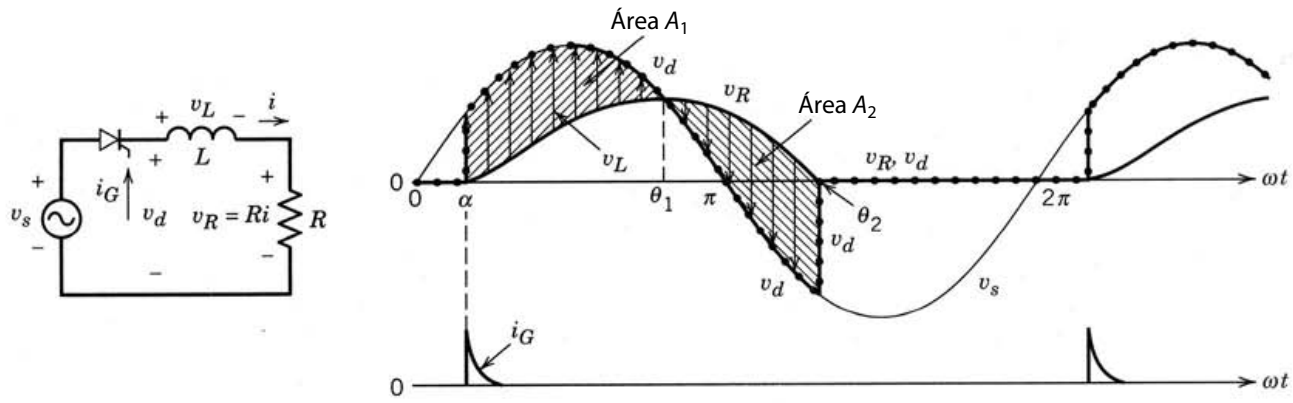
En estos dispositivos la salida se controla ajustando el ángulo de disparo de cada SCR, con lo cual se obtiene una salida de tensión ajustable en un rato limitado.

### 2.3.1 Circuitos de Tiristores.

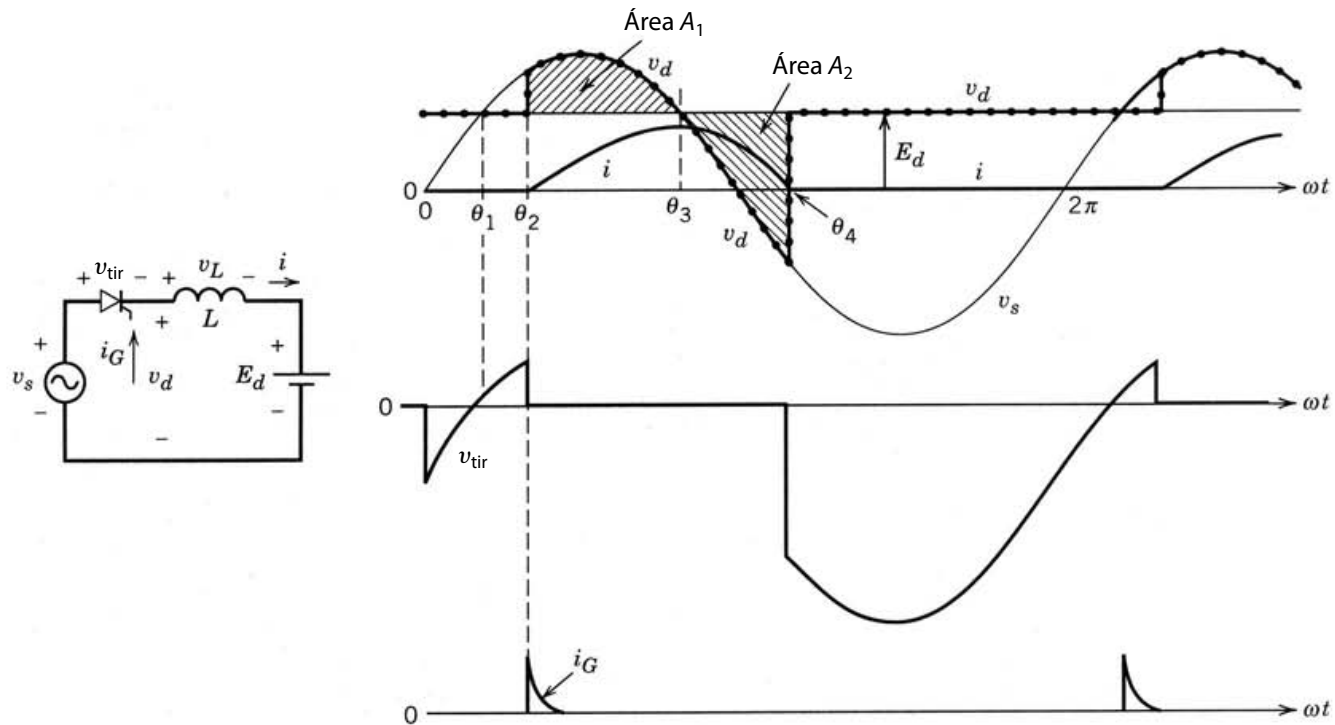
Un circuito básico de tiristores como el que se muestra a continuación, está compuesto de una fuente de C.A. un SCR y una carga que para simplificar el caso de ejemplo es solamente una carga resistiva.



La mayoría de las cargas que tienen que ser alimentadas son una combinación R-L por lo que es importante observar y tener en cuenta los efectos de la inductancia en la conmutación.



La presencia de capacitores de gran capacidad o fuentes de C.C. alterna en el circuito pueden ocasionar fenómenos que se tienen que tener presentes



### Circuito de Control de disparo de un tiristor.

Al controlar el instante en el cual se dispara el tiristor, se puede tener un control de la salida promedio desde cero hasta un valor máximo. Para ello se utiliza un circuito de control que se capaz de generar los pulsos de disparo en el gatillo del tiristor ( $i_G$ ).

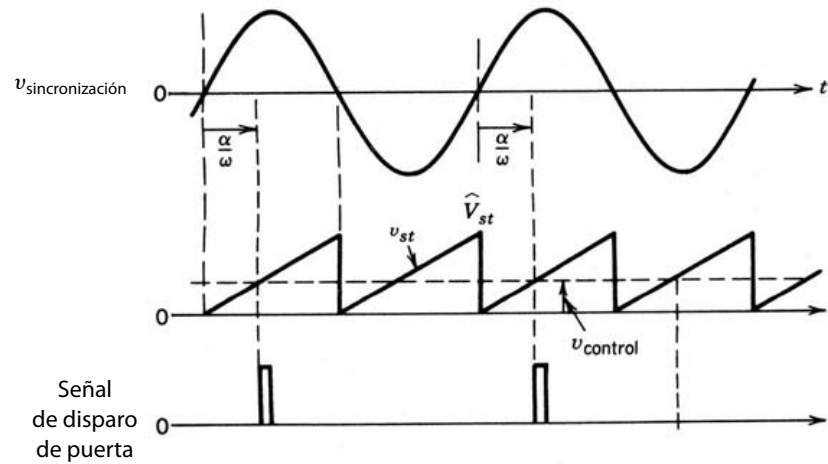
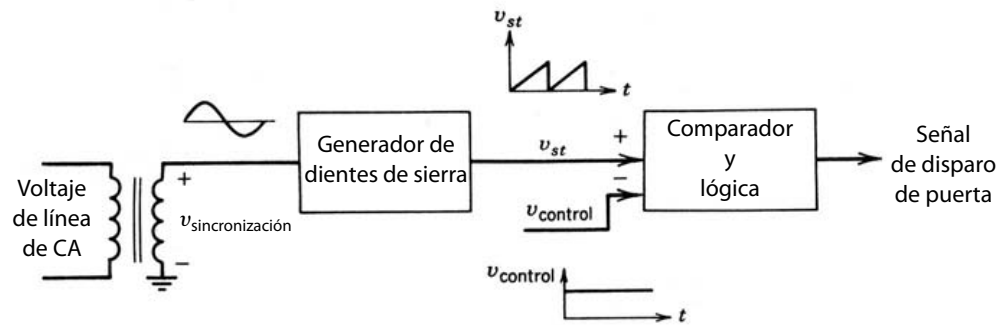
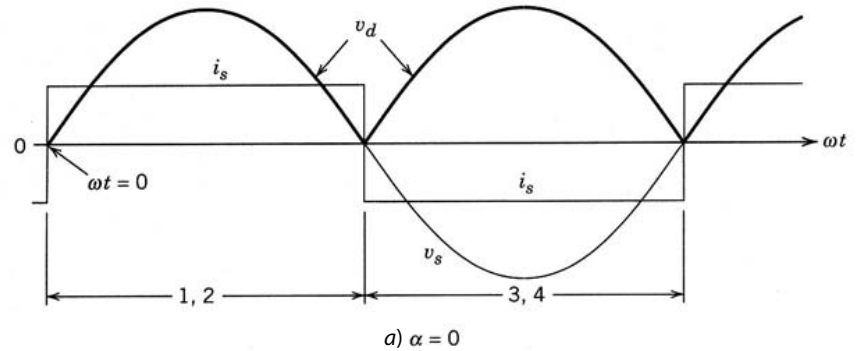
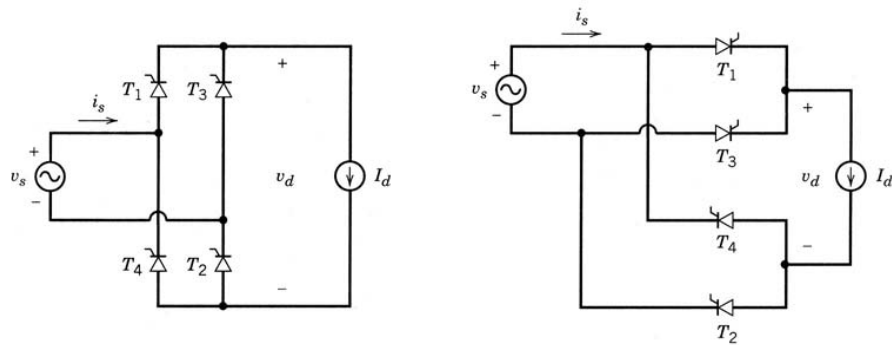


Fig de c  
pue

### 2.3.2 Convertidores Monofásicos.

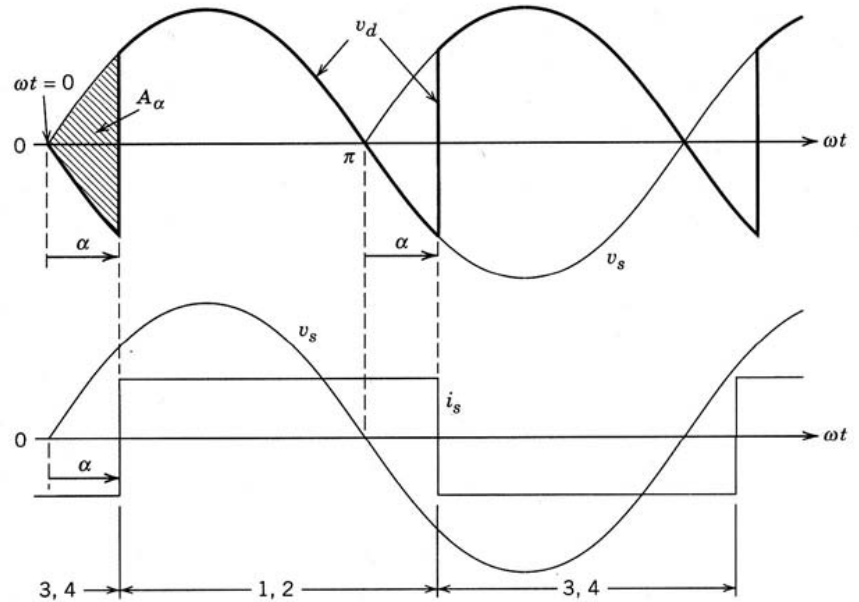
Si los convertidores monofásicos pudieran ser disparados prácticamente en el cruce por cero de la onda de C.A. la respuesta de estos sería muy similar a la mostrada en los convertidores monofásicos no controlados, sin embargo, si controlamos el instante en el cual los tiristores entran en conducción (ángulo de disparo), se puede controlar el voltaje promedio a la salida del convertidor.



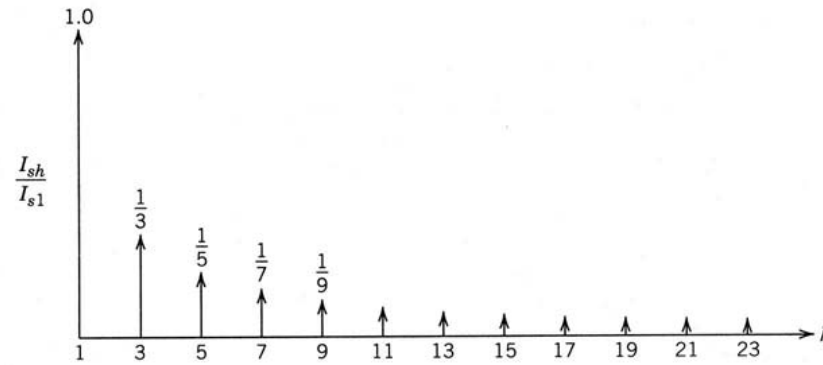
$$V_{do} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}V_s \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s = 0.9V_s$$

$$V_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}V_s \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha = 0.9V_s \cos \alpha$$

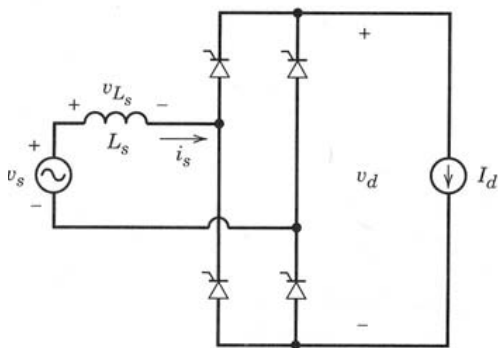
$$P = I_d \left( \frac{1}{T} \int_0^T v_d \, dt \right) = I_d V_d = 0.9V_s I_d \cos \alpha$$



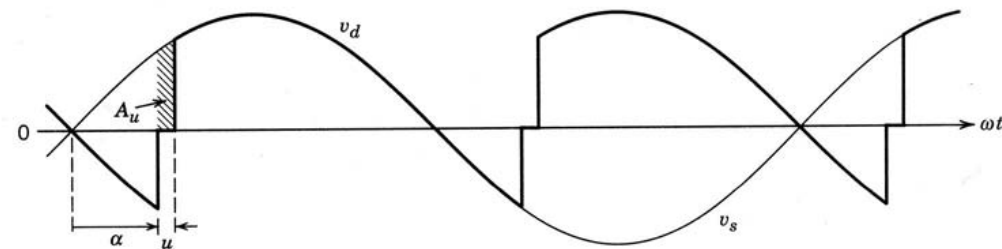
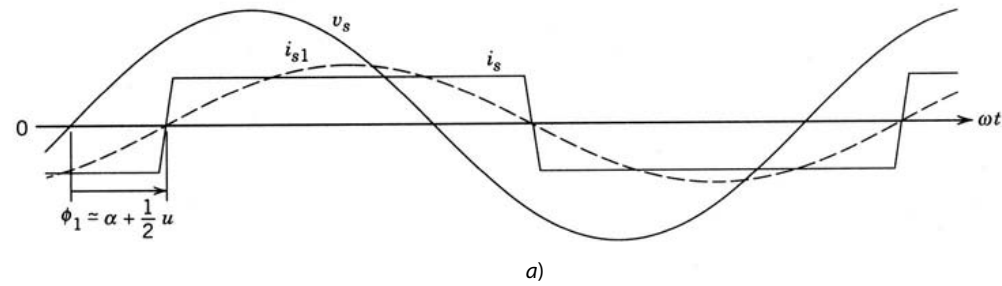
La utilización de este tipo de convertidor introducirá en los circuitos el siguiente espectro de contenido armónico.



Efecto de L en los convertidores monofónicos.



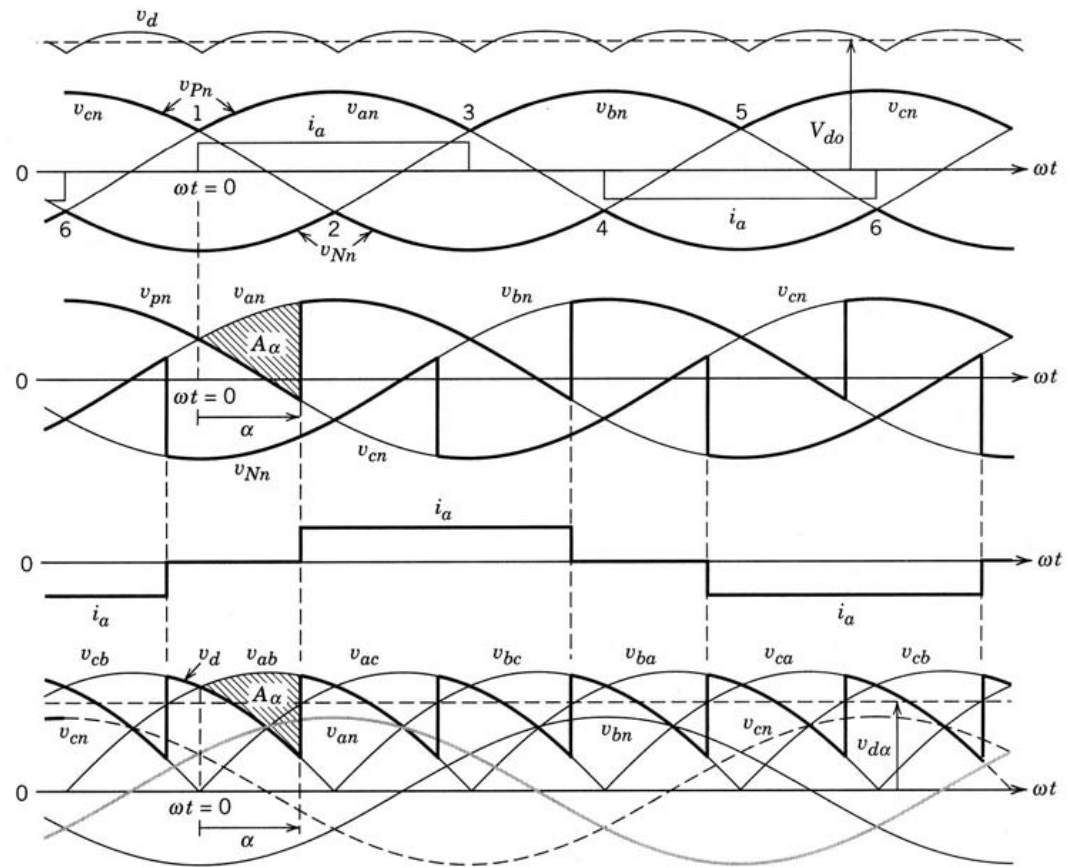
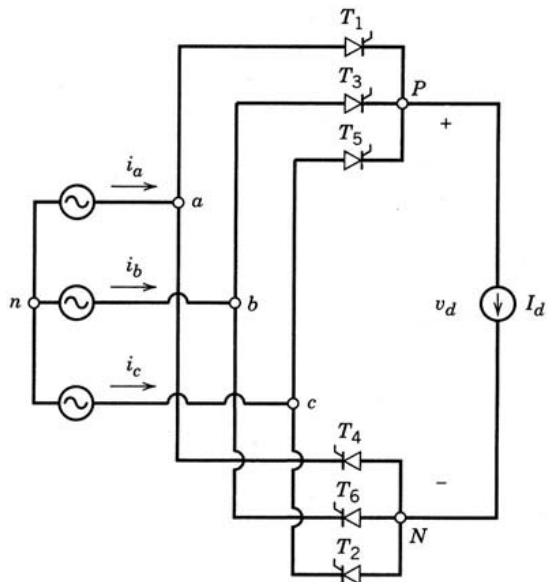
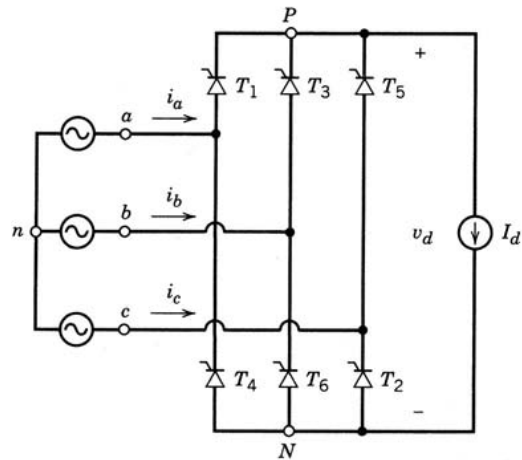
$$V_d = 0.9V_s \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \omega L_s I_d$$





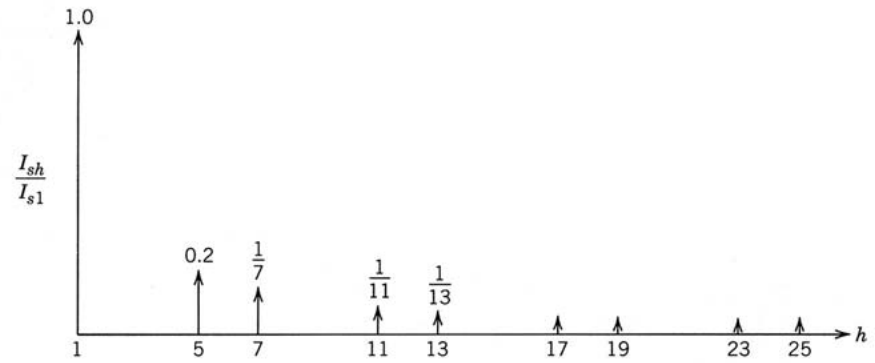
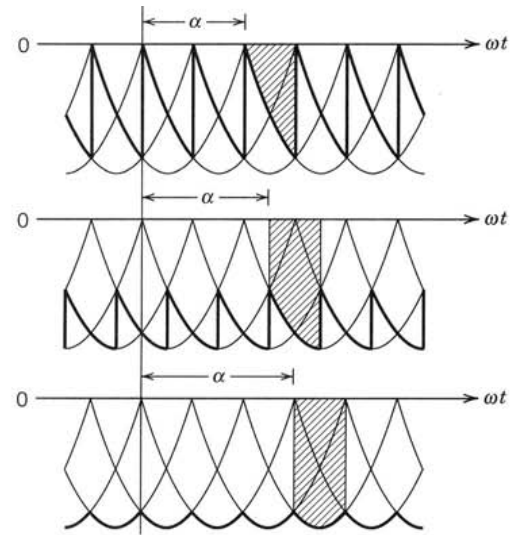
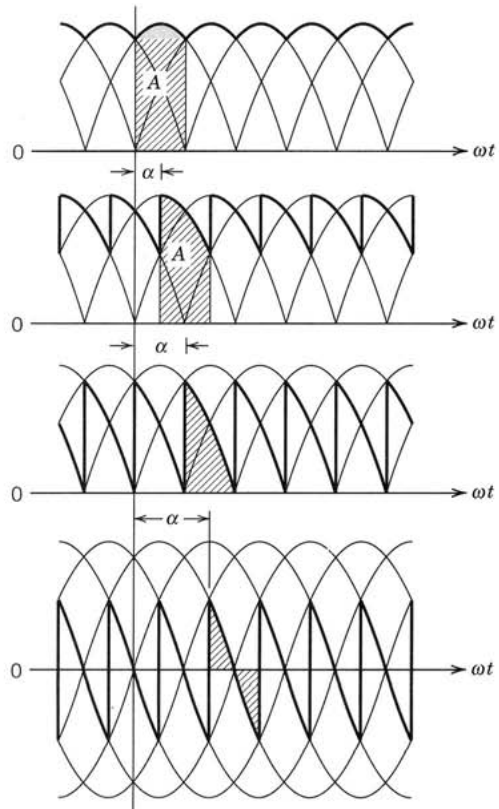
### 2.3.3 Convertidores trifásicos.

Para aplicaciones que requieran un mayor potencia de salida, se pueden implementar convertidores trifásicos.

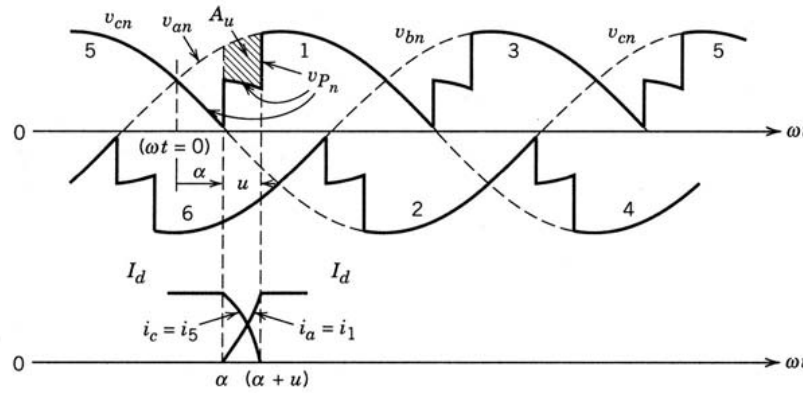
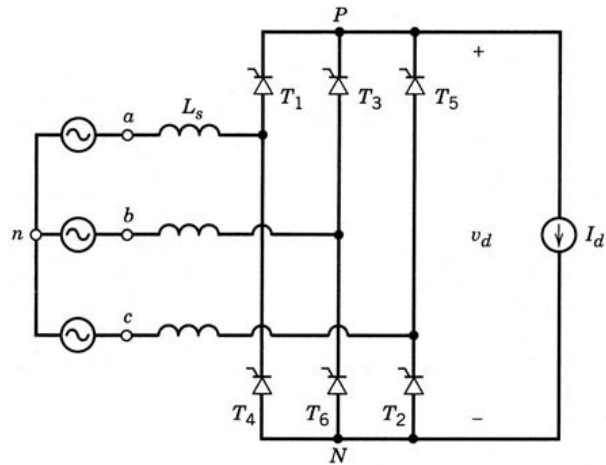


$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha = 1.35 V_{LL} \cos \alpha = V_{do} \cos \alpha$$

$$P = V_d I_d = 1.35 V_{LL} I_d \cos \alpha$$



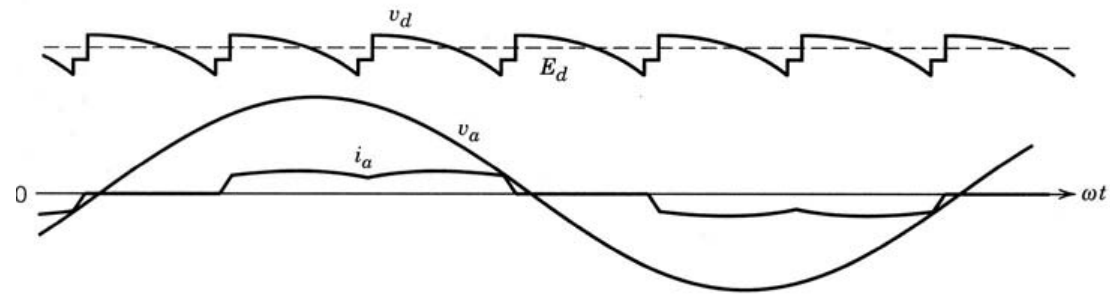
### Análisis con el efecto de la $L_s$



$$A_u = \omega L_s \int_0^{I_d} di_a = \omega L_s I_d$$

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha - \frac{3\omega L_s}{\pi} I_d$$

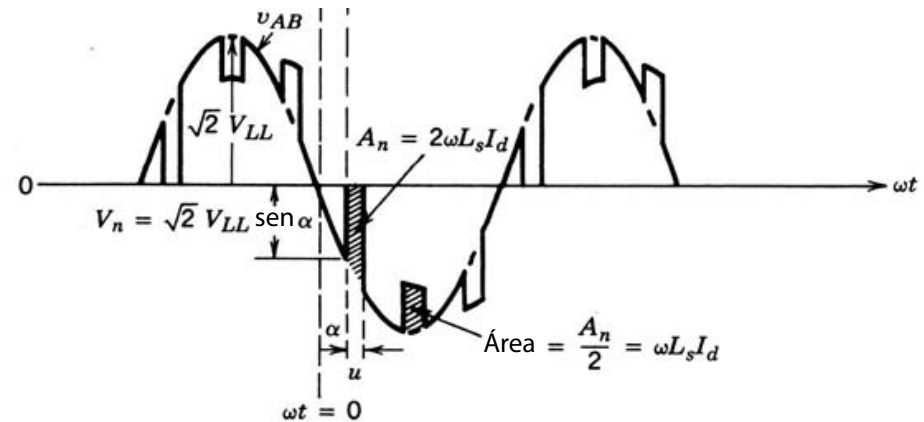
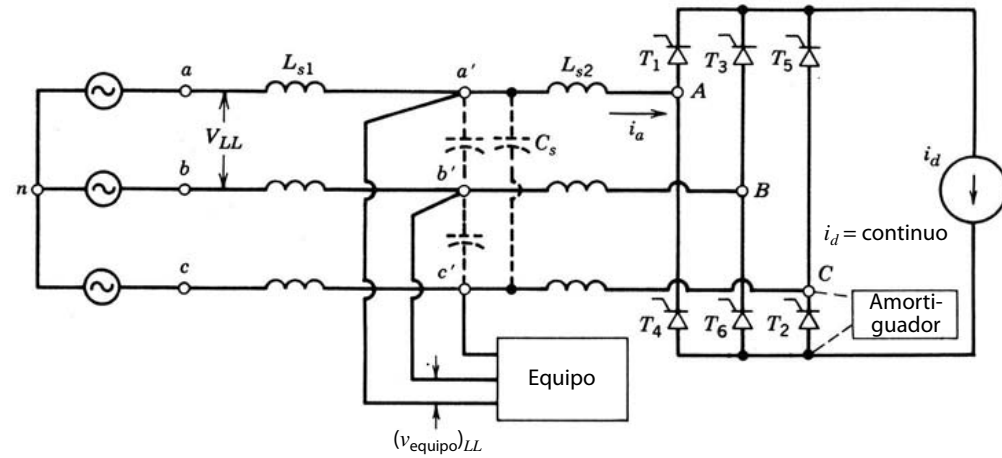
Los convertidores prácticos entregarían formas de onda como las que se presentan a continuación para un convertidor trifásico con tiristores.



Otro de los efectos que se generan en el lado de alterna son las muestras. las cuales se generan en el lado de alterna y son ocasionadas por la presencia de las inductancias del lado de alterna ( $L_{s1}$ ) y el lado de directa ( $L_{s2}$ ) en un factor de  $\rho$ .

$$\rho = \frac{L_{s1}}{L_{s1} + L_{s2}}$$

$$\text{Voltaje \%THD} = \frac{\left[ \sum_{h \neq 1} (I_h \times \omega L_{s1})^2 \right]^{1/2}}{V_{\text{fase(fundamental)}}} \times 100$$

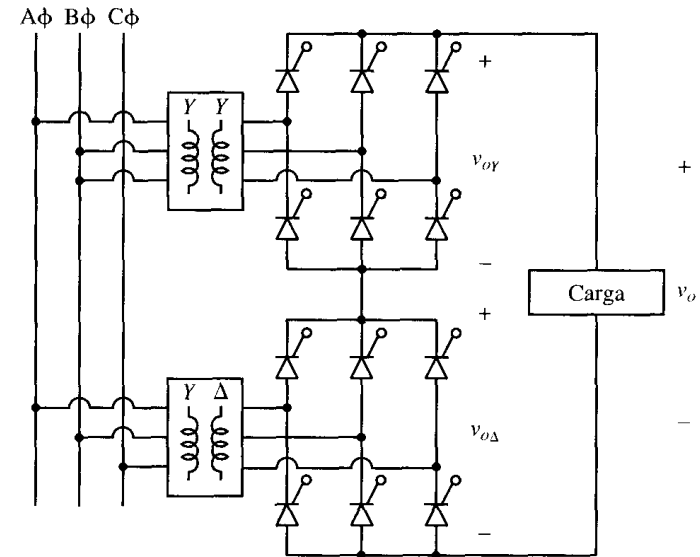


### 2.3.4 Otros Convertidores Trifásicos.

Ademas de los vistos en las secciones anteriores, existen convertidores que parten de estos:

- Convertidor de 12 pulsos.

Existen convertidores de mayor número de pulsos que producen un menor rizado, aunque sus costos de control y mantenimiento son menores.



### III CONVERTIDORES

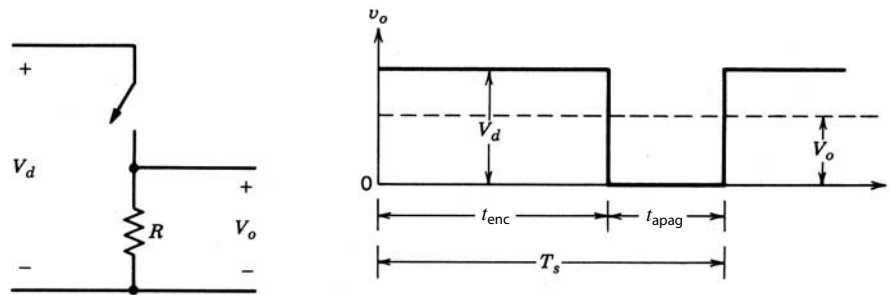
- 3.1 Control de Convertidores.
- 3.2 Convertidor Reductor.
- 3.3 Convertidor Elevador.
- 3.4 Convertidor Reductor/Elevador.
- 3.5 Convertidores de Puente Completo.

Mohan 3era Ed. Convertidores de Modo de Conmutación CC-CC Pag. 142  
Hart 1er Ed. Convertidores CC-CC Pag. 201

#### 3.1 Control de Convertidores.

Los convertidores de CC-CC son circuitos de potencia que convierten una tensión continua a otro nivel de tensión continua y normalmente, proporcionan una salida regulada. Estos convertidores son utilizados extensamente en sistemas de suministro de energía de CC regulados de modo de conmutación y en aplicaciones de accionamientos motrices. Para el caso de los sistemas de suministro de energía, casi siempre vendrán acompañados de un transformador que proporcionara adecuación de voltaje y aislamiento eléctrico y en el caso de accionamiento motrices, generalmente no llevan transformador.

En los convertidores de CC-CC, el voltaje medio de salida debe controlarse para que permanezca en el nivel deseado aún y cuando fluctúen el voltaje de entrada o la carga a la salida. Para lograr este control los convertidores en modo de conmutación utilizan uno o mas convertidores que controlan el voltaje medio de salida mediante el control de los tiempos de encendido ( $t_{on}$ ) y apagado ( $t_{off}$ ).



Otro tipo de control utiliza la conmutación con una frecuencia constante, por lo tanto el periodo  $T = t_{on} + t_{off}$  es constante y el ajuste de la duración de encendido del interruptor controla el voltaje medio de salida. Este método se denomina computación por ancho de pulso o PWM (Pulse Width Modulation)

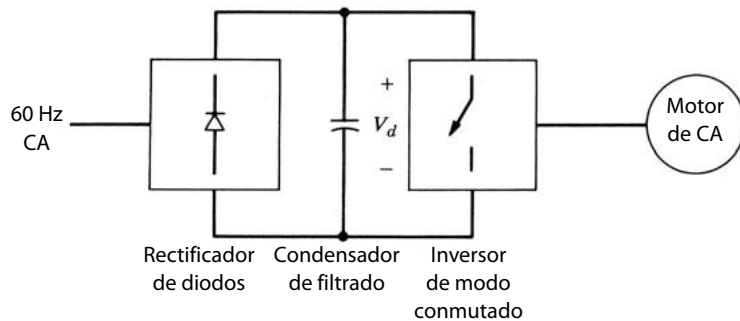
## IV INVERSORES

- 4.1 Inversores de Modo Conmutado.
- 4.2 Inversores Monofásicos.
- 4.3 Inversores Trifásicos.
- 4.4 Inversores PWM y SPWM.

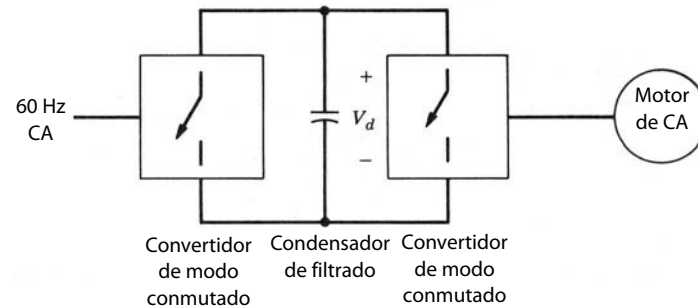
Electrónica de Potencia, Mohan 3era edición. Cap 8. Inversores de CC-CA de modo conmutado pag 176

### 4.0 INTRODUCCIÓN.

Los inversores de CC-CA de modo conmutado se usan en motores de CA y fuentes de alimentación no interrumpibles, sistemas donde el objetivo es producir una salida sinusoidal de CA cuya magnitud y frecuencia pueden controlarse.



Control de velocidad.

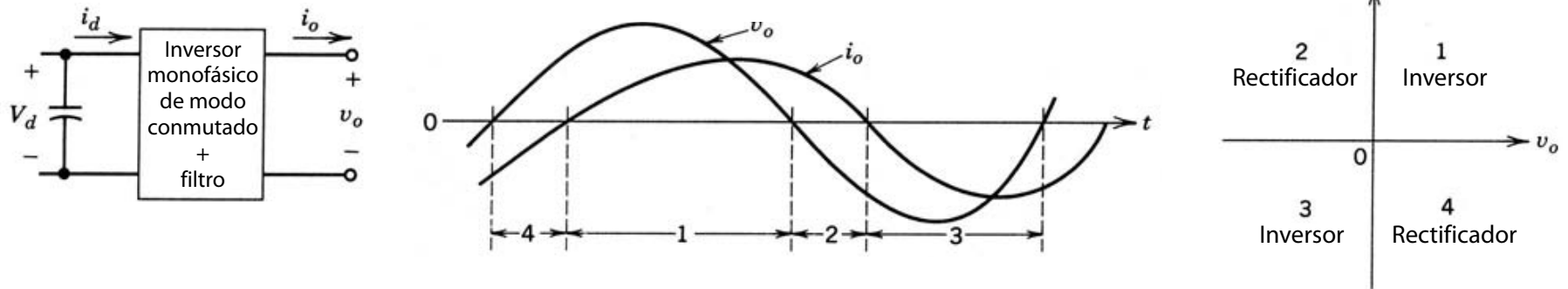


Control velocidad + Frenado regenerativo.



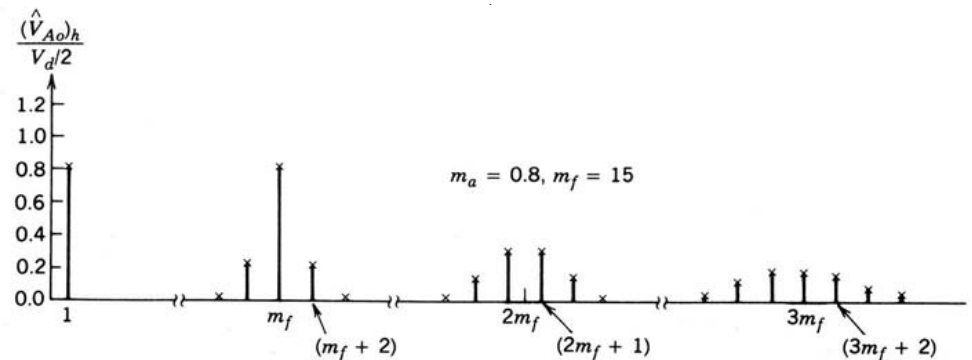
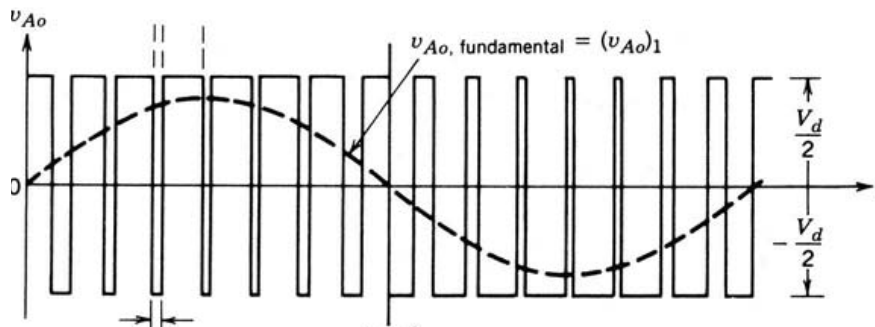
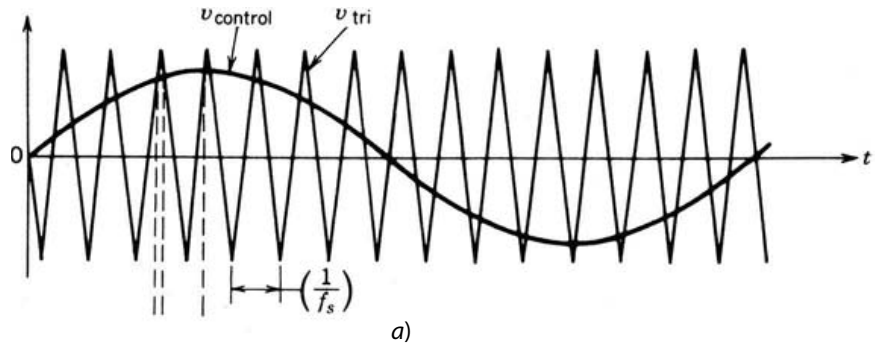
#### 4.1 INVERSORES DE MODO CONMUTADO.

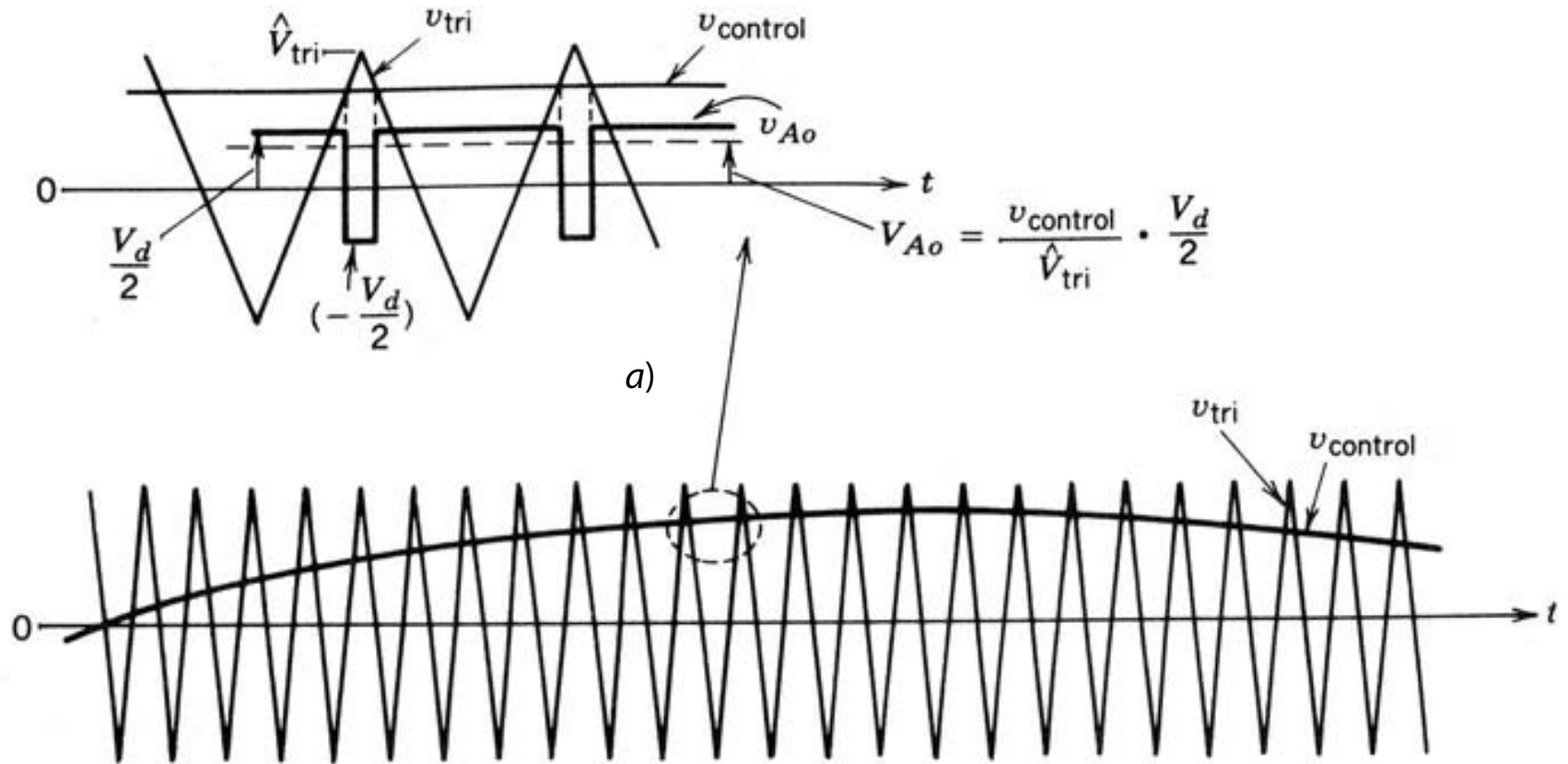
Es esquema de inversor simplificado permite realizar un análisis general.



Método de conmutación por ancho de pulsos.

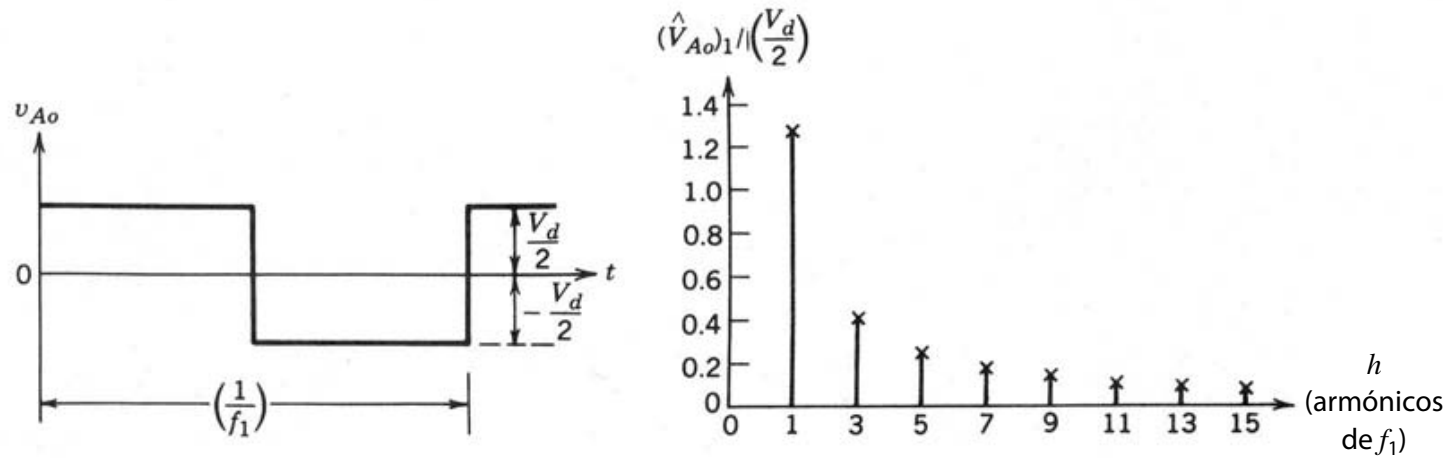
En las secciones anteriores se comentó sobre el PWM para un rectificador, donde se comparaba una señal de control constante, con un voltaje triangular repetitivo. Sin embargo el PWM que se requiere para un inversor es un poco más complejo, ya que se pretende tener un voltaje senoidal a una frecuencia que puede ser variable.





Para este tipo de PWM se requiere tener en cuenta dos conceptos que pueden modificar las características y condiciones de operación del PWM, la modulación de amplitud ( $m_a$ ) que permitirá controlar la amplitud de salida del inversor y se refiere a la amplitud del voltaje de control y la modulación de frecuencia ( $m_f$ ) que permite modificar la frecuencia de la señal triangular.

## Conmutación por Onda Cuadrada



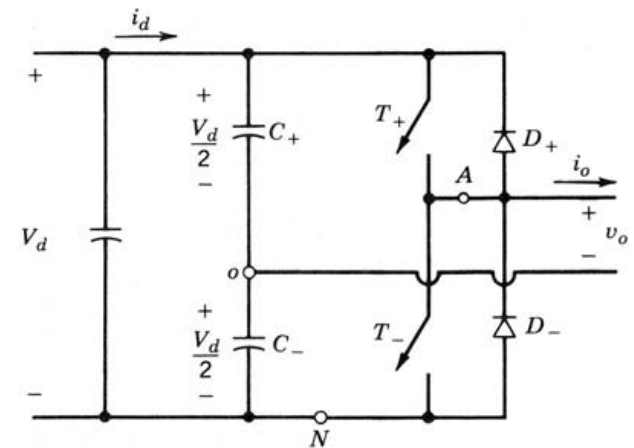
Una ventaja de este tipo de conmutación es que los interruptores solo cambian de estado dos veces por ciclo, por lo que es importante para aplicaciones de alta potencia.

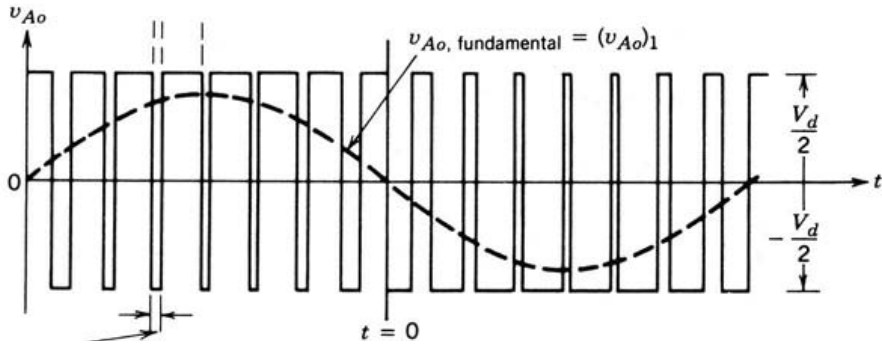
## 4.2 INVERSORES MONOFÁSICOS.

### Inversor de Monofásico de Medio Puento.

Este tipo de inversores funcionan con dos capacitores de igual valor que se conectan en serie entre ellos y en paralelo con la entrada de CC. El valor de los capacitores debe ser lo suficientemente grande para que el potencial  $V_{oN}$  permanezca casi constante.

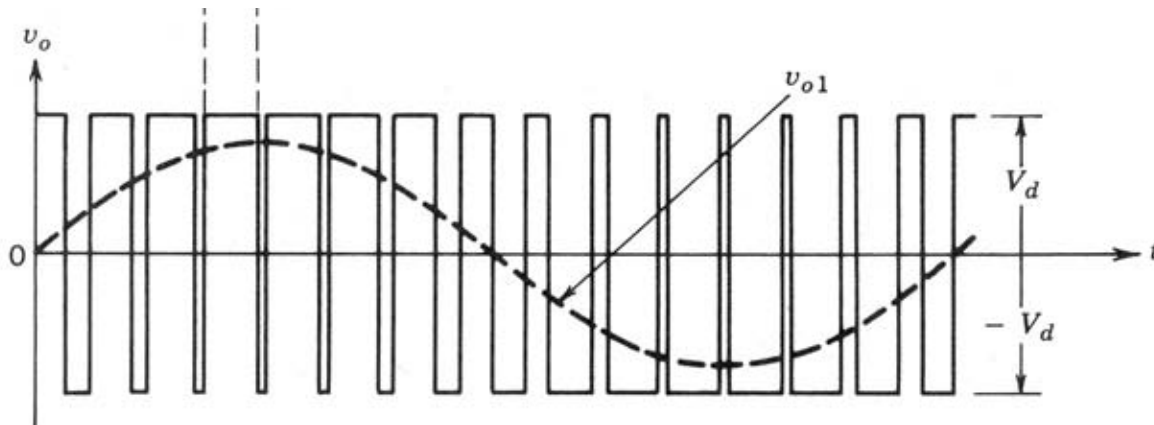
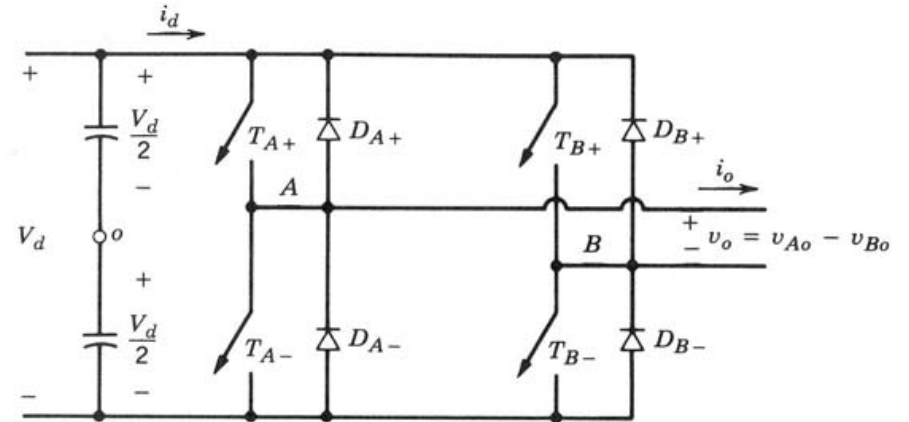
Los interruptores  $T_+$  y  $T_-$  se controlan mediante un PWM que generan una salida como la de la siguiente figura.





### Inversor Monofásico de Puente Completo

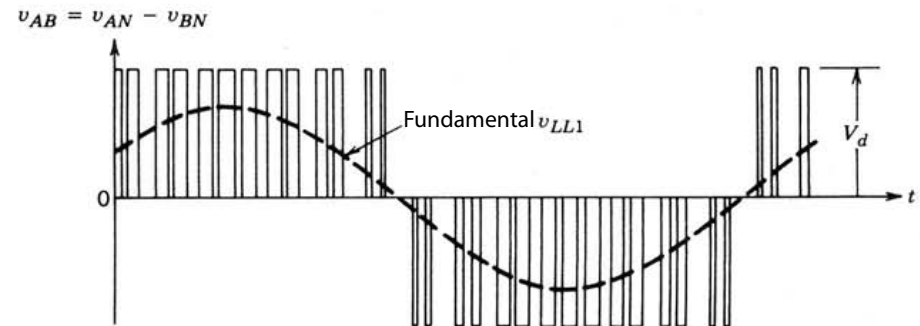
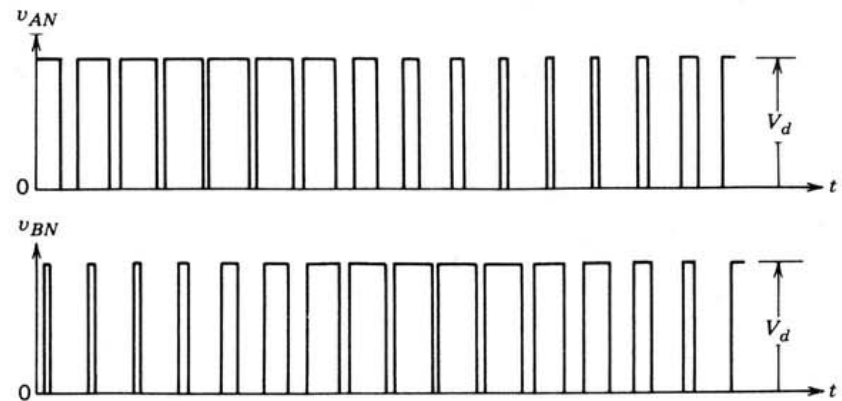
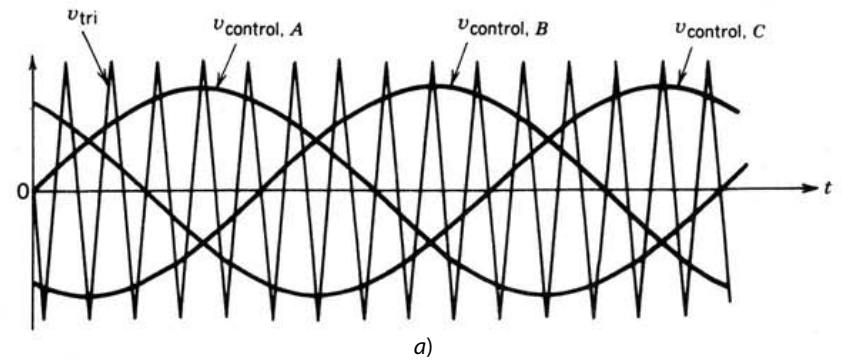
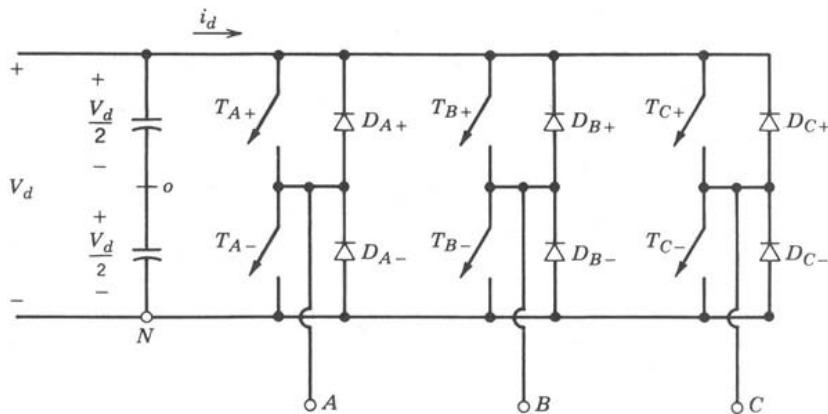
Este tipo de inversor consiste de dos inversores de medio puente y se utiliza cuando se requieren potencias nominales mas altas, ya que, con el mismo voltaje de entrada  $V_d$ , proporciona el doble del voltaje máximo de salida que el medio puente.



El control de conmutación se realiza por lo que se denomina PWM con conmutación por voltaje bipolar

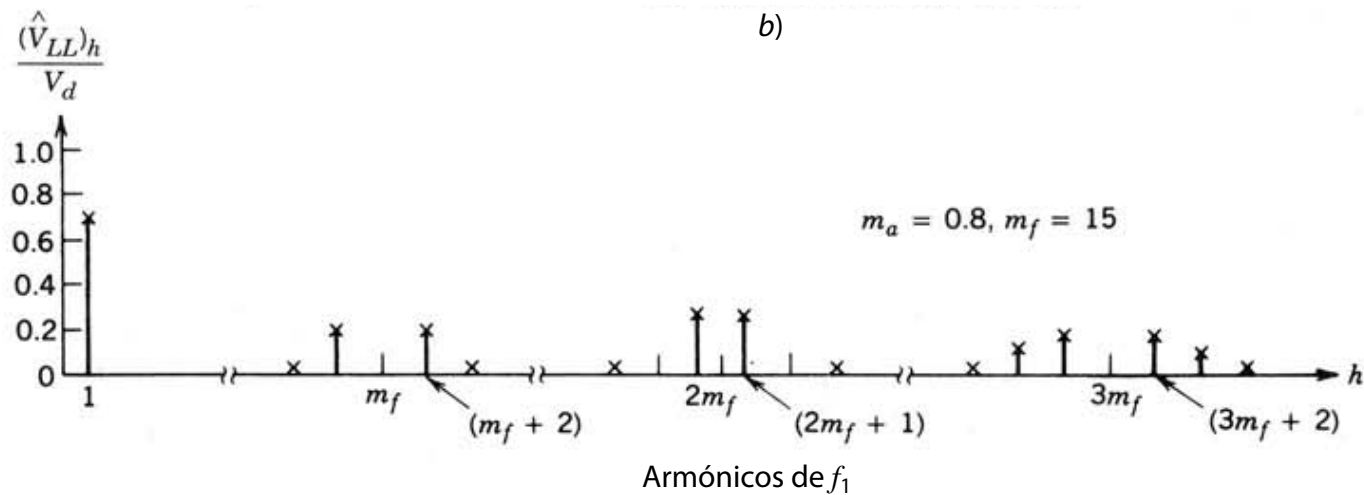
### 4.3 INVERSORES TRIFÁSICOS.

En aplicaciones como fuentes de alimentación no interrumpirles y control de motores trifásicos, los inversores trifásicos son de uso común. Aunque este tipo de cargas se pueden a alimentar con tres inversores monofásicos que estén produzcan una salida desfasada  $120^\circ$  entre ellas, se requieren transformadores trifásicos y 12 interruptores, por lo que normalmente no se realiza de esta manera.



#### 4.4 INVERSORES PWM Y SPWM.

Como en los inversores monofásicos, el objetivo de los inversores trifásicos modulados por el ancho de pulsos es formar y controlar los voltajes de salida trifásicos en magnitud y frecuencia por medio de un voltaje de entrada de C.C. para ello se compara una forma de onda de voltaje triangular con tres formas de onda de voltaje de control senoidales separadas  $120^\circ$  entre ellas.



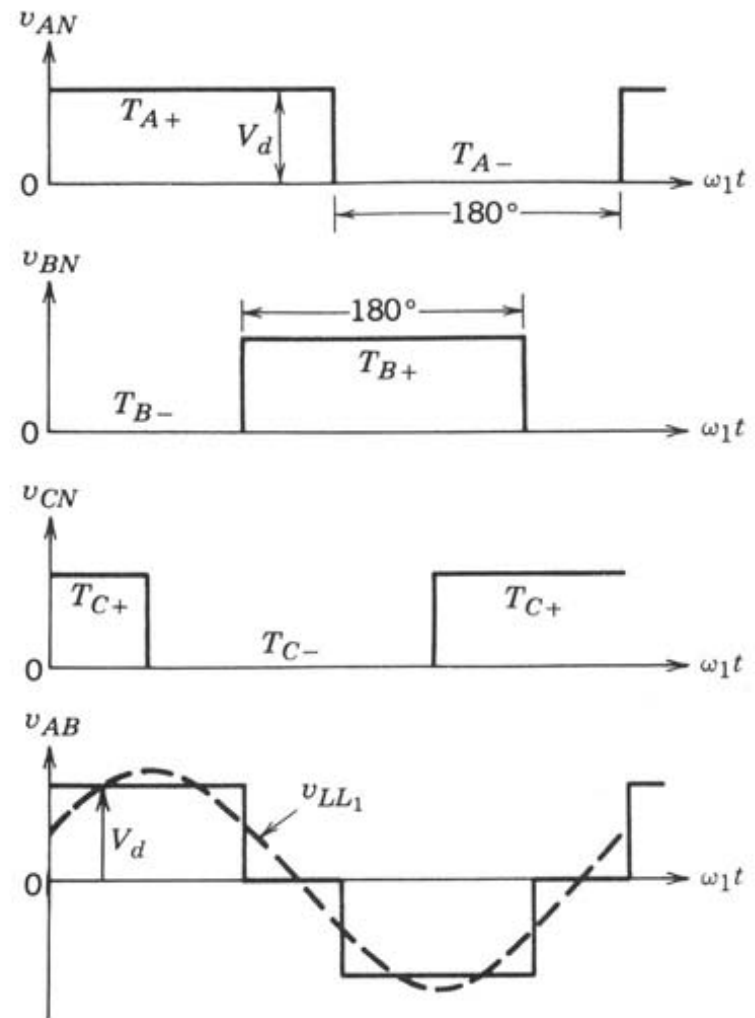
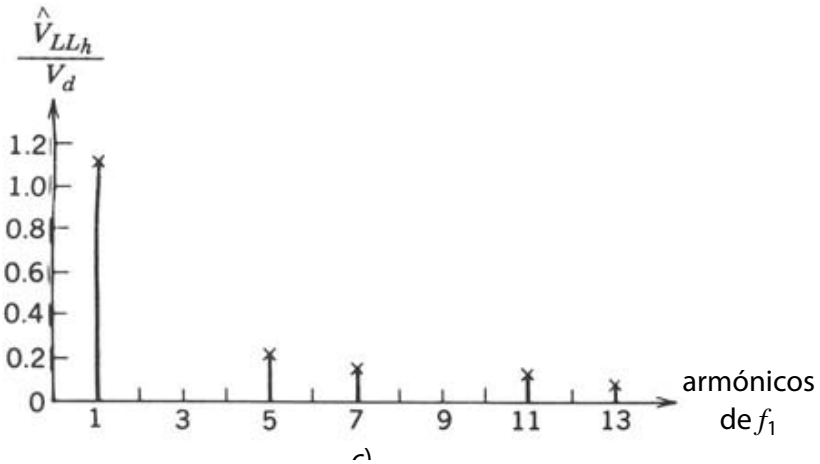
Consideraciones:

- Para valores bajos de  $m_f$  a fin de eliminar los armónicos pares, se debe utilizar un PWM sincronizado y  $m_f$  debe ser entero par, Además debe ser múltiplo de 3 para cancelar los armónicos más dominantes en el voltaje de línea.
- Durante una sobremodulación  $m_a > 1$ , sin tener en cuenta el  $m_f$  se deben estudiar las condiciones de un  $m_f$  pequeño.

## SPWM

Si el voltaje de CC es controlable, el inversor funcionara en el modo de ondas cuadradas. Ademas para valores lo bastante grandes de  $m_a$  el PWM degenera a una operación de ondas cuadradas. Aquí cada interruptor esta encendido  $180^\circ$ .

En modo de SPWM, el inversor no puede controlar la magnitud de los voltajes de CA de salida, por lo tanto si requiere controlar la magnitud de voltaje de CA se debe tener control del voltaje de CC



## **V FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE C.C.**

5.1 Fuentes de Alimentación Lineales.

5.2 Convertidores con Aislamiento Eléctrico.

5.3 Control de Fuentes de Alimentación de Modo Conmutado.

5.4 Protección de Fuentes de Alimentación.

Bibliografía: Electrónica de Potencia, Mohan, 3era Ed. Capitulo 10 Fuentes de Alimentación de CC Conmutadas; pag. 265.

### 5.0 INTRODUCCIÓN.

Las fuentes de alimentación de CC reguladas se utilizan prácticamente en todos los sistemas analógicos y digitales, donde cumplen alguna de las siguientes funciones:

- Salida Regulada.- La tensión de salida debe ser constante para cambios en la tensión de entrada o variaciones de carga.
- Aislamiento.- Proporciona aislamiento eléctrico entre la salida y la entrada.
- Múltiples Salidas.- Se pueden requerir múltiples salidas con distintos valores de tensión y/o corriente, positivas o negativas e inclusive estas salidas podrían estar aisladas entre sí.



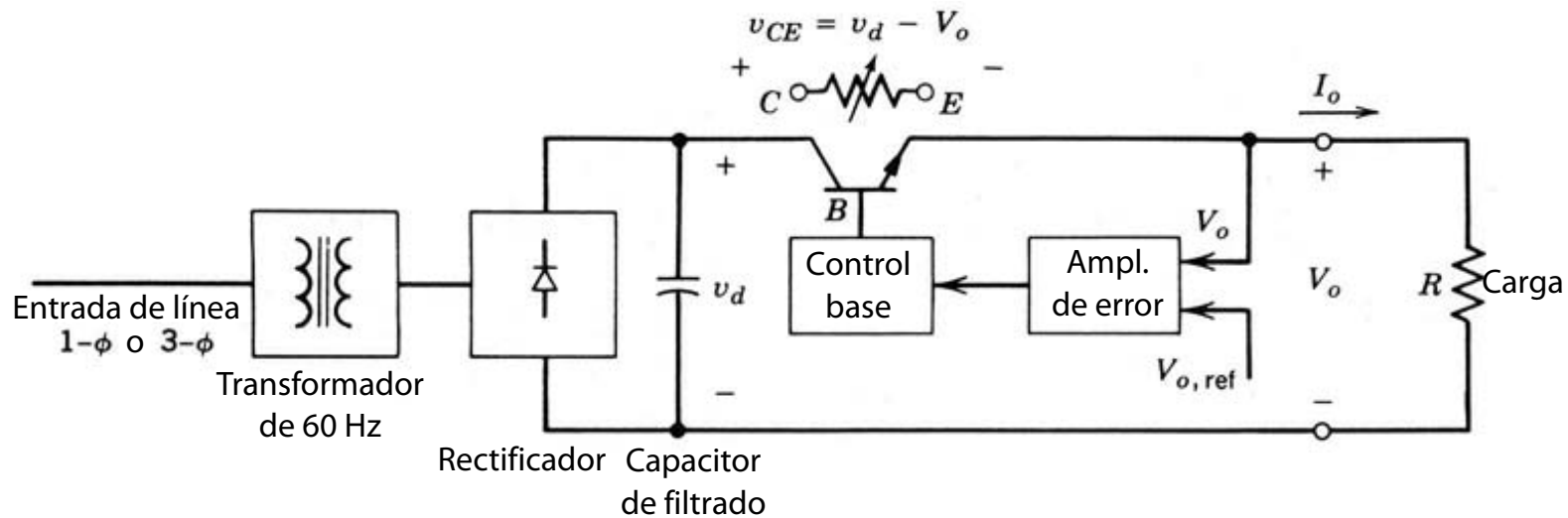
## 5.1 FUENTES DE ALIMENTACIÓN LINEALES.

Las fuentes de alimentación lineales fueron las primeras que se diseñaron, son mas grandes que las conmutadas y tienen algunas características diferentes.

Desventajas.

- Tamaño y peso debido al transformador.
- Perdida de potencia en el transistor, eficiencias del 30-60%.

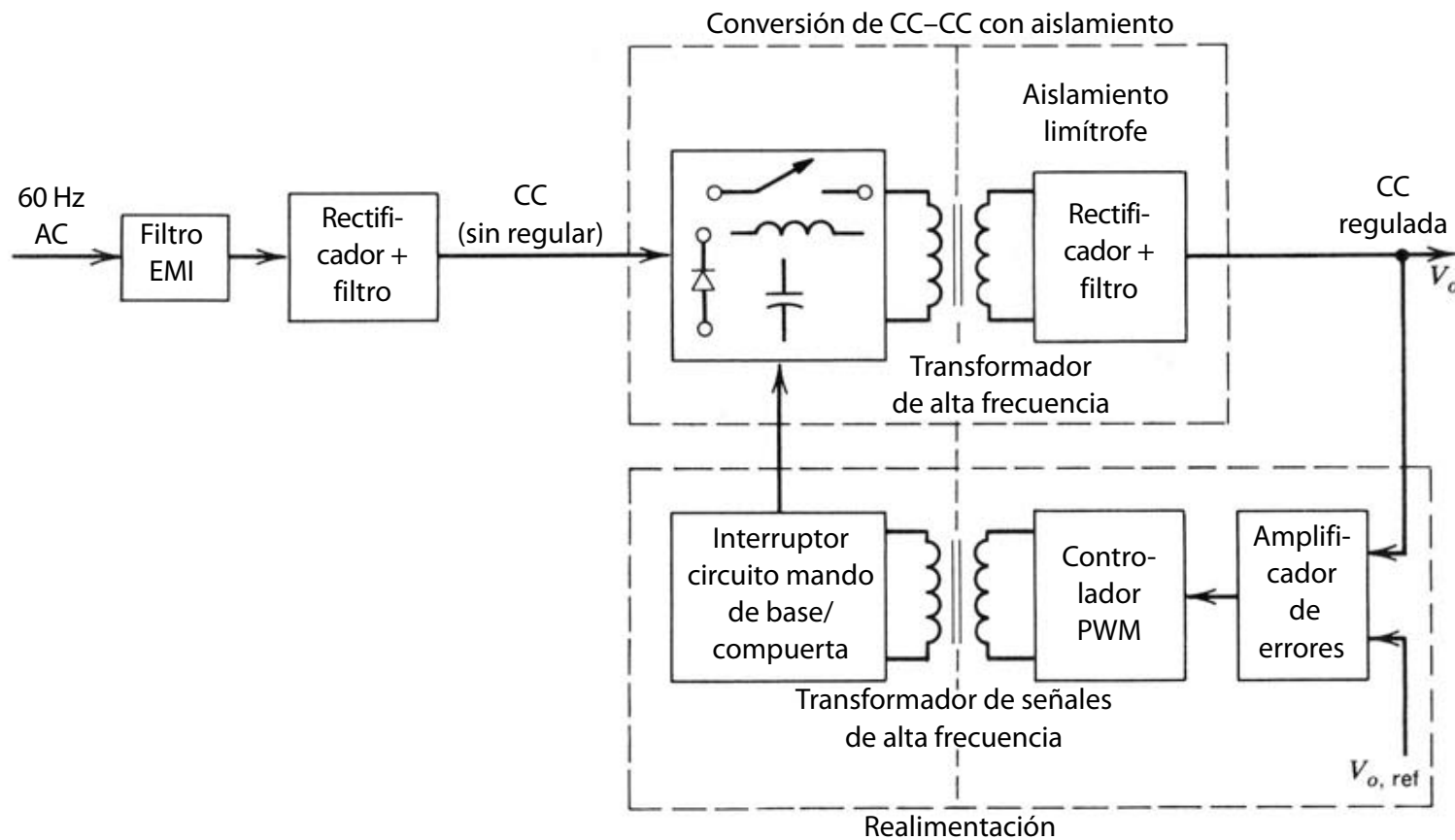
Ventajas: Utilizan circuitos sencillos, por lo que para pequeñas potencias (<25W) cuentan menos, además no producen grandes EMI (Interferencia Electromagnética).



## 5.2 CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO ELÉCTRICO.

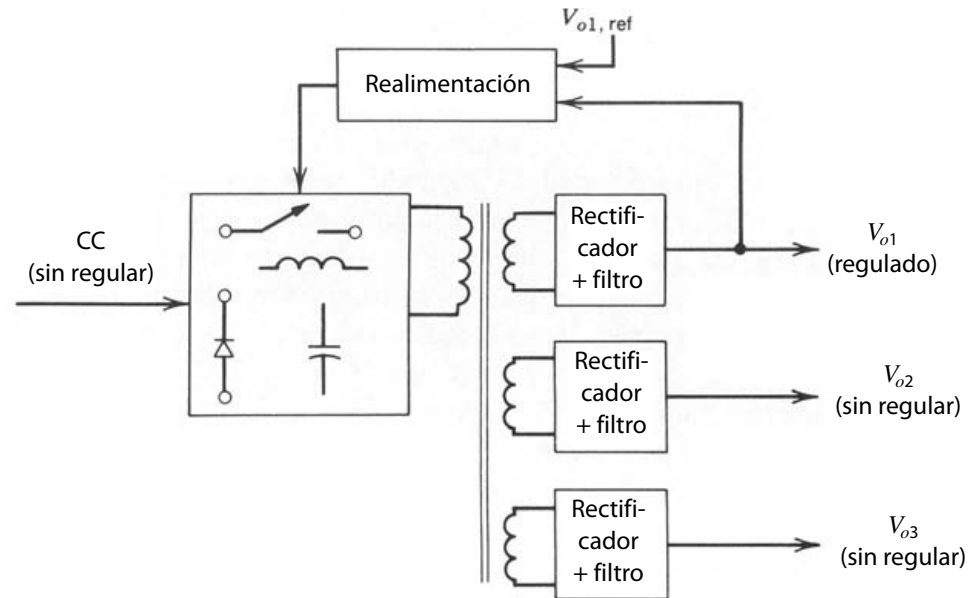
Introducción a Fuentes de alimentación conmutadas.

En las fuentes de alimentación lineales, la transformación del voltaje de CC de un nivel al deseado se logra por medio de circuitos de convertidores CC-CC, añadiendo a este esquema, transformadores de frecuencia y algunos otros esquemas.

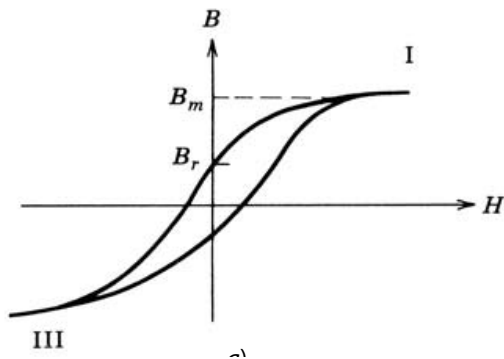


Una de las ventajas de este tipo de fuentes de alimentación, bajo el mismo esquema se pueden tener varias a salidas a distintos valores y polaridades, aisladas o sin aislamiento eléctrico.

Como se puede ver, la principal desventaja de las fuentes de conmutación es que son mucho mas complejas y se tienen que tomar medidas adecuadas para suprimir los EMI debido a las conmutaciones de alta frecuencia.



### FUENTES CON AISLAMIENTO ELÉCTRICO



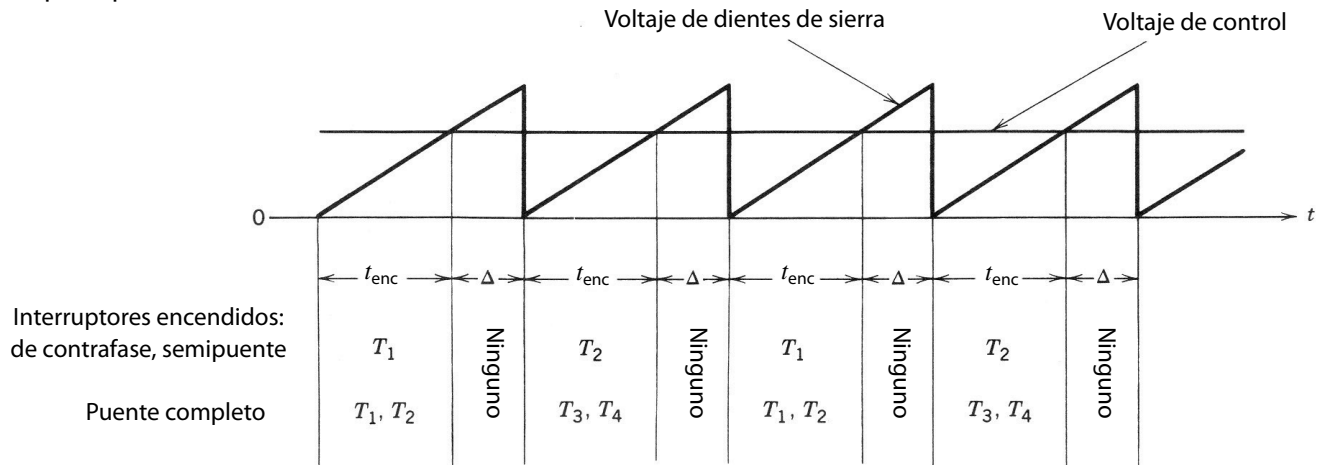
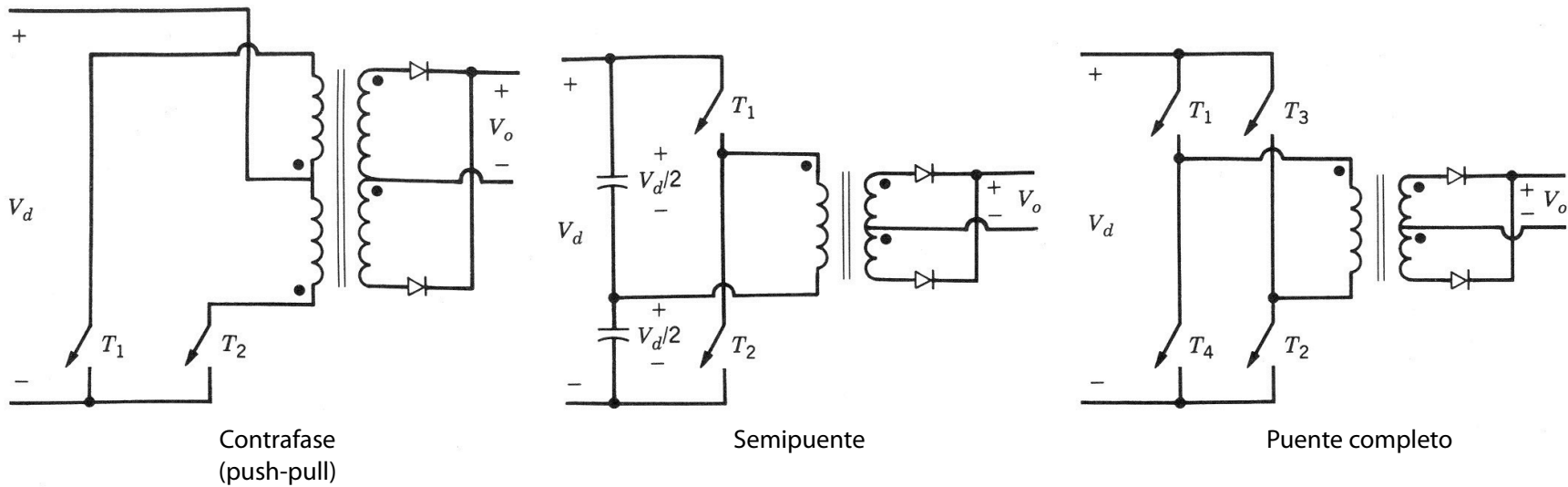
Cómo se observo en la introducción a las fuentes de alimentación conmutadas, el aislamiento eléctrico en este tipo de fuentes se da a través de un transformador de aislamiento de alta frecuencia. Los transformadores presentan una curva característica de comportamiento denominada curva de histéresis (curva B-H) donde B es la densidad de flujo en el núcleo del transformador y H es la intensidad de flujo. En base a la curva de histéresis, las fuentes con aislamiento eléctrico se dividen en dos tipos.

- a) Excitación unidireccional del núcleo (cuadrante I). Ejemplos de estos son el convertidor flyback (derivado del buck/boost) y el convertidor directo (derivado del buck).
- b) Excitación bidireccional del núcleo (cuadrante I y III). Para proporcionar un aislamiento eléctrico se utilizan

topologías de inversores monofásicos de modo conmutado para producir una onda cuadrada de CA en la entrada del transformador de aislamiento de alta frecuencia.

De este tipo de pueden dar ejemplos como:

- Contrafase (push-pull).
- Semipuente.
- Puente completo.



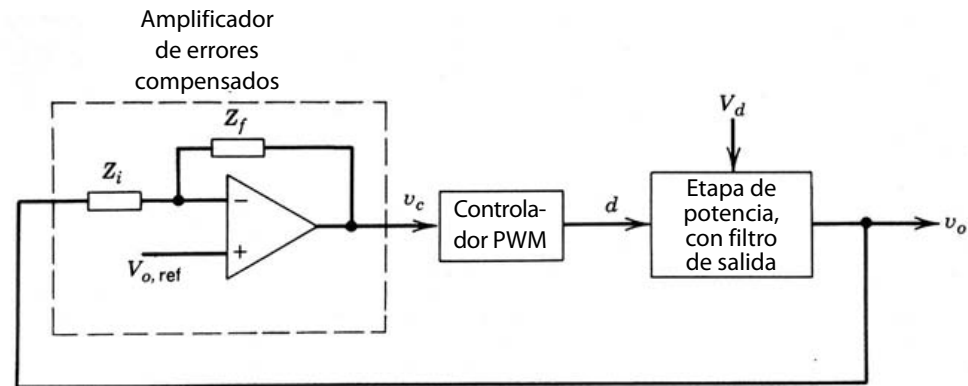
Selección del núcleo del transformador en convertidores de CC-CC con aislamiento eléctrico.

Es deseable tener transformadores de potencia de poco peso y tamaño, con pérdidas de potencia bajas, la idea de utilizar altas frecuencias de conmutación es reducir el tamaño del transformador de potencia y los componentes para filtrado.

### 5.3 CONTROL DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE MODO CONMUTADO.

Los voltajes de salida de fuentes de alimentación de CC se regulan para estar dentro de una banda de tolerancia especificada en respuesta a los cambios en la carga de salida y los voltajes de la línea de entrada. Esto se logra mediante un sistema de control por alimentación negativa.

Para ello, la salida del convertidor  $v_o$  se compara con su valor de referencia  $V_{o,ref}$  en caso de que exista diferencia, el amplificador produce un voltaje de control  $v_c$  con que se ajusta la relación de trabajo del interruptor o los interruptores del convertidor.

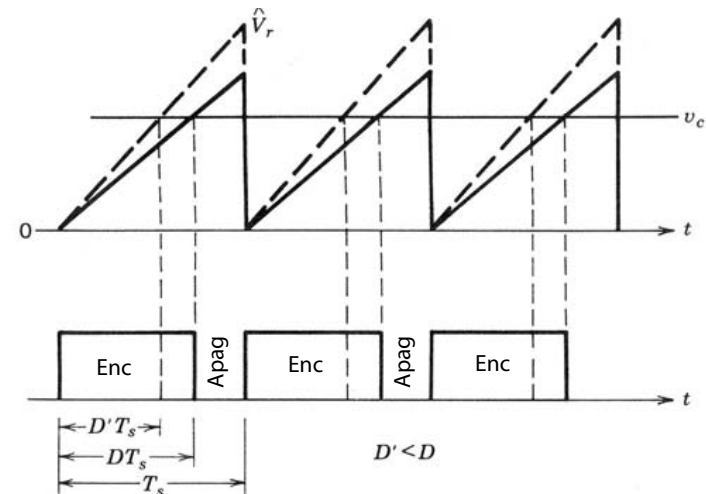


Casos particulares.

Control de alimentación PWM de alimentación directa de voltaje.

En el control PWM de relación de trabajo directo, si se cambia el voltaje de entrada, se produce un error de voltaje de salida que al final se corrige por el control de realimentación, lo cual genera un desempeño dinámico lento.

Si se ajusta la relación de trabajo en forma directa a las variaciones en el voltaje de entrada la salida del convertidor permanecerá sin cambios. Esto se logra al alimentar el nivel del voltaje de entrada al voltaje de diente sierra.



#### 5.4 PROTECCIÓN DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN.

Algunos de los métodos de protección para asegurar la operación de las fuentes de alimentación conmutadas pretenden garantizar que el voltaje de salida estará disponible bajo casi cualquier condición.

—Arranque suave.

Este tipo de arranque se requiere por el lento incremento de la relación de trabajo y por ende del voltaje de salida después del encendido del voltaje de entrada.

—Protección de Voltaje.

Protección contra voltajes máximos y mínimos.

— Limitación de Corriente.

Para la protección de corriente de salida del circuito, se detecta la medición del voltaje a través de una resistencia de detección. Cuando este voltaje detectado excede un umbral de compensación de temperatura de 200mv, la salida del amplificador de errores se pone a tierra y disminuye en forma lineal el ancho de pulsos de la salida.

## VI APLICACIONES DE ACCIONAMIENTO DE MOTORES.

6.1 Motores de CD.

6.2 Motores de Inducción.

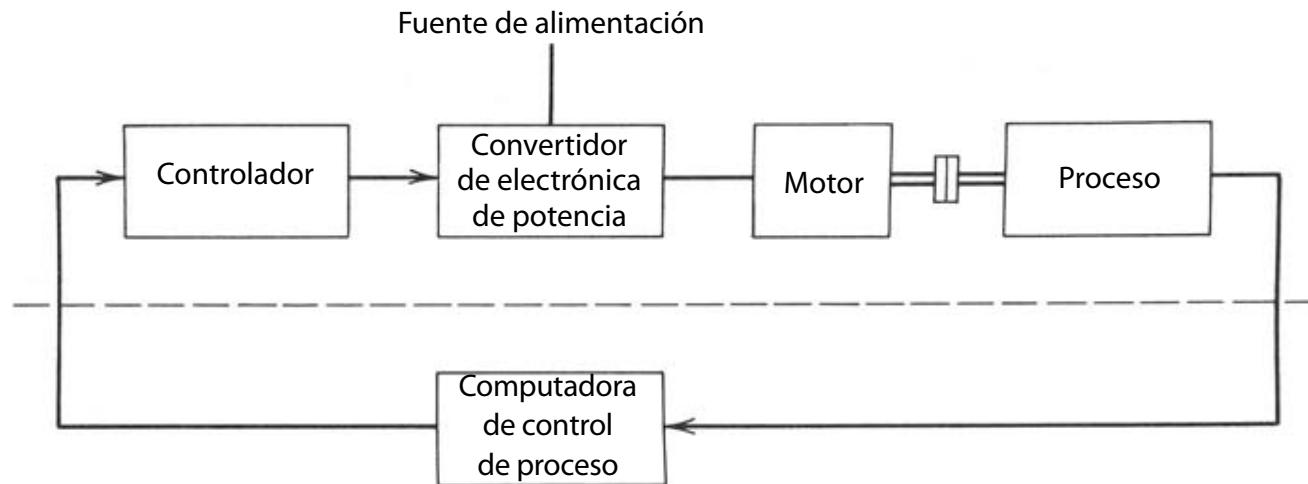
6.3 Motores Síncronos.

Bibliografía: Electrónica de Potencia, Mohan 3ed Capítulos 12,13, 14 y 15

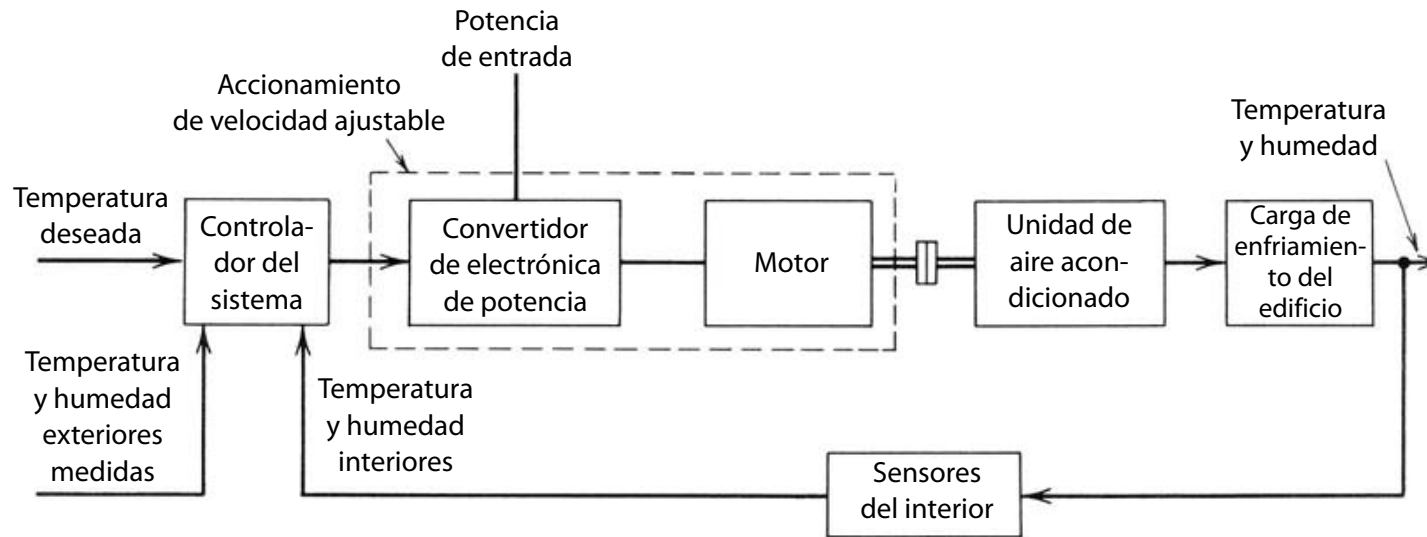
### 6.0 Introducción.

Los accionamientos por motor se utilizan en un rango de potencia muy amplio, que van desde unos cuantos watts hasta kilowatt o inclusive megawatts. Los tipos de aplicaciones van desde accionamientos muy precisos de robótica hasta los más sencillos como accionamientos de equipo de bombeo. Dependiendo del tipo de aplicación, la precisión y de la potencia, se pueden utilizar accionamientos de motor de corriente continua, accionamientos de control por motor de inducción o accionamientos de motor síncronos.

Un diagrama general de un sistema de control se puede observar en la figura 6.1. El tipo de proceso determina los requisitos para el accionamiento del motor



En un gran número de aplicaciones, la precisión y el tiempo de respuesta del motor para obedecer el comando de velocidad no son críticos. En estos casos existe un lazo de retroalimentación para controlar el proceso en el exterior del accionamientos del motor. Un ejemplo se presenta para un sistema de control de velocidad de un aire acondicionado.



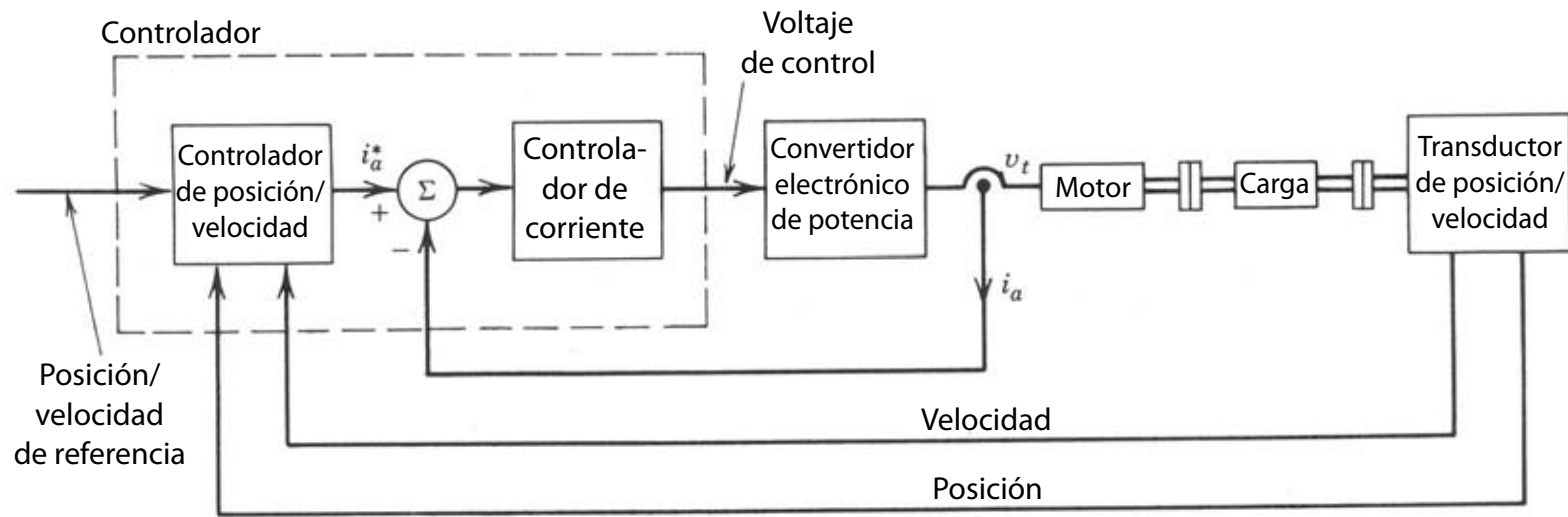
## 6.1 Motores de CD.

Los accionamientos por motor de CD se han utilizado para aplicaciones de control de velocidad y posición; aunque se ha incrementado el uso de servo-accionamientos, en aplicaciones donde casi no se requiere mantenimiento, aún se emplean los accionamientos de CD por su bajo costo inicial y su excelente desempeño.

### SERVOACCIONAMIENTOS DE CD

En las servoaplicaciones, la velocidad y precisión de respuesta es importante. Si no fuese por las desventajas de tener un conmutador y escobillas, los motores de CD serían ideales para servoaccionamientos. Esto es porque el par de torsión  $T_{mec}$  se controla de forma lineal mediante el control de la corriente de armadura del motor  $i_a$ .





## ACCIONAMIENTOS DE CD DE VELOCIDAD AJUSTABLE.

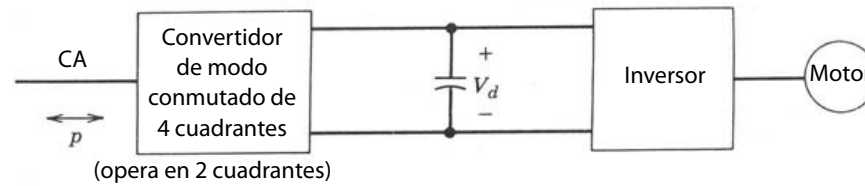
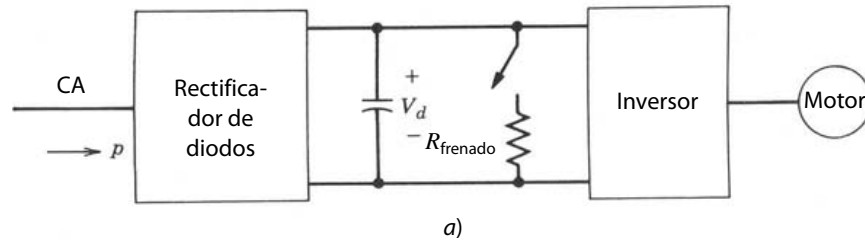
A diferencia de los servoaccionamientos, el tiempo de respuesta a comandos de velocidad y par de torsión no es tan crítico en accionamientos de velocidad ajustable. Por lo tanto, para el control de velocidad se emplean convertidores de CC-CC de modo conmutado como los visto anteriormente.

### 6.2 Motores de Inducción.

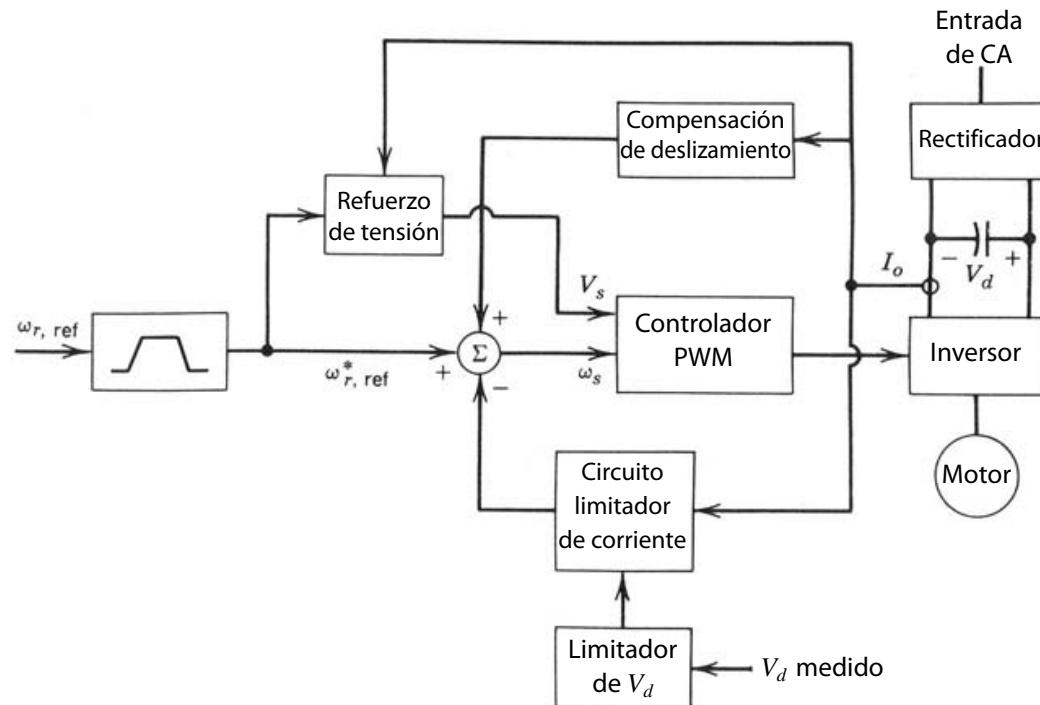
Los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla son las principales herramientas de la industria, debido a su bajo costo y su construcción resistente. Cuando se operan directamente a voltaje de línea, un motor de inducción trabaja casi a velocidad constante. Sin embargo por medio de convertidores de electrónica de potencia es posible variar la velocidad de un motor de inducción al controlar la frecuencia de alimentación. Los accionamientos para motor de inducción se pueden clasificar en dos grandes categorías:

1. Accionamientos de velocidad ajustable, se utilizan en control de procesos donde controlan la velocidad de ventiladores, compresores, bombas, sopladores, etc.

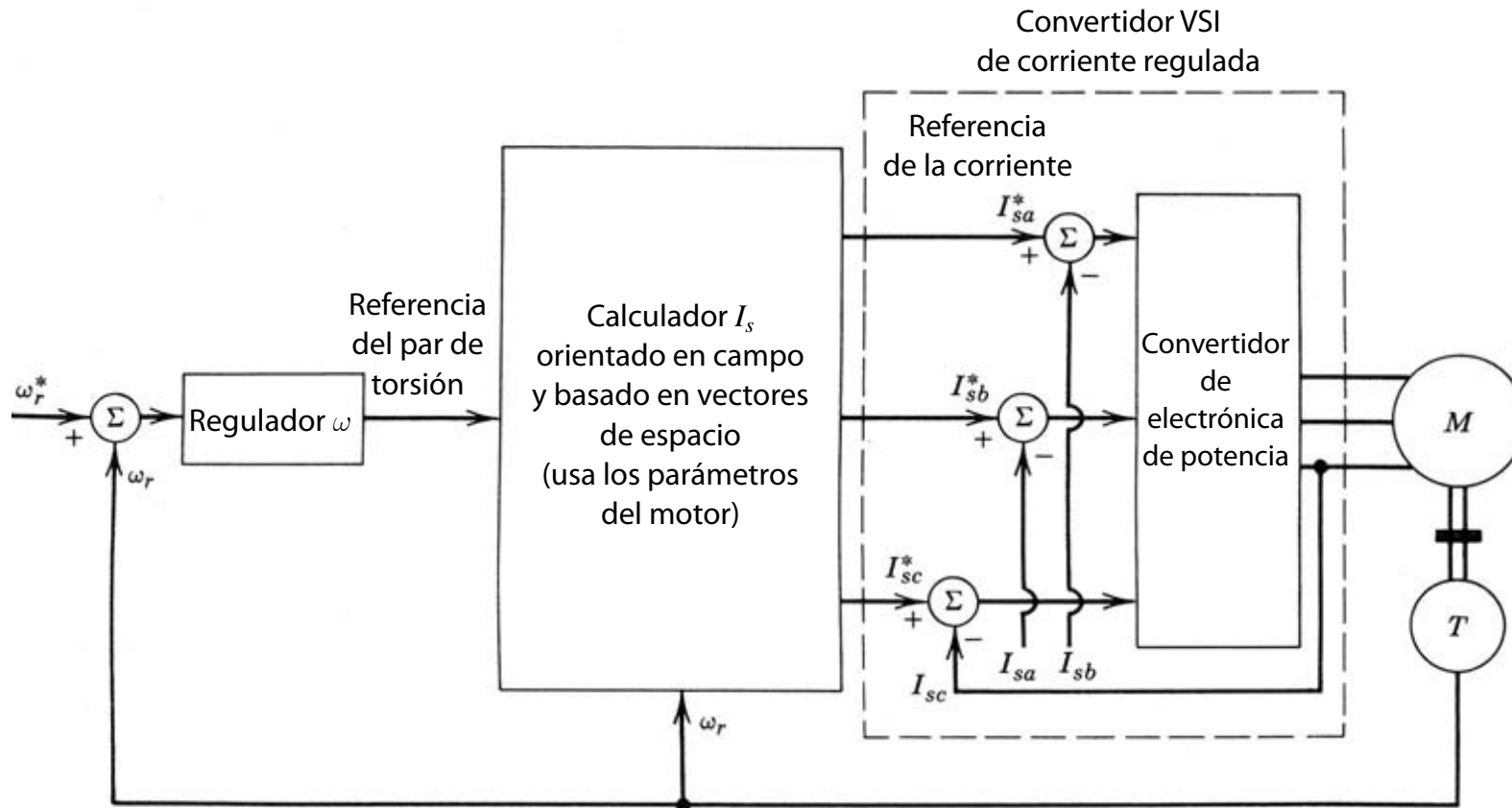
2. Servoaccionamientos, por medio de un control avanzado, los motores de inducción pueden ser utilizados como servoaccionamientos en periféricos de computadoras, máquinas de herramientas y robótica.



Ejemplo de circuito de control de velocidad de lazo abierto.

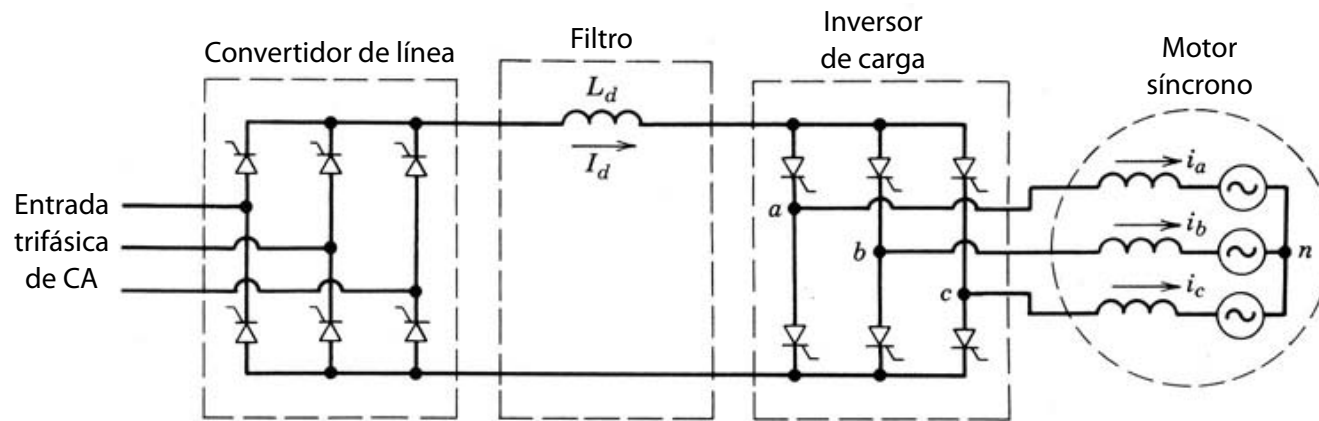


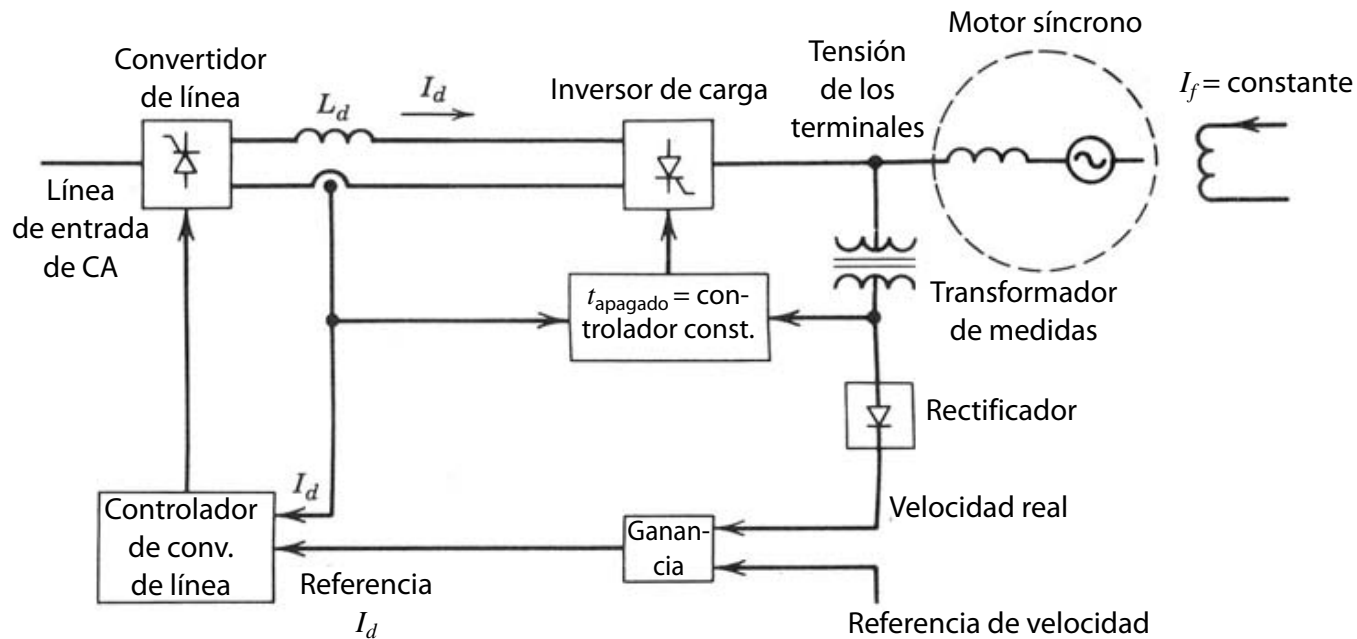
Los controles para los servoaccionamientos de motor de inducción son mas complejos ya que debe responder manera rápida y precisa al comando del par de torsión sin oscilación en todas las velocidades, incluso en reposo, pues estos accionamientos sirven para el control de posiciones. Este control se realiza mediante calculo orientados en el campo y basados en vectores de espacio de lo que deben ser las corrientes de estator del motor.



### 6.3 Motores Síncronos.

Los motores síncronos se usan como servoaccionamientos en aplicaciones como equipos periféricos de computadoras, robótica y accionamiento de velocidad ajustable como bombas de calor moduladas, ventiladores grandes y compresores. En aplicaciones de baja potencia (pocos kwatts) se utilizan motores síncronos de imanes permanentes. A estos motores también se les conoce como motores de CC sin escobillas o motores electrónicamente conmutados.





De manera real la corriente  $I_f$  no se mantiene constante sino que se controla en función de las variaciones de carga y velocidad, con el fin de mantener el flujo especificado en el entrehierro del motor.

Especificaciones para esquemas LCI (Load Commutated Inverter) o características que debe tener este sistema de control, son:

1. Para uso con motores síncronos con potencias mayores a 1000HP producen eficiencias cercanas a 95%.
2. El inversor conmutado por carga es mucho más sencillo y con menores pérdidas que un para motor de inducción.
3. Los esquemas LCI tienen también la capacidad de proporcionar como característica adicional la operación como frenado regenerativo.

## 6.A CICLOCONVERTIDORES.

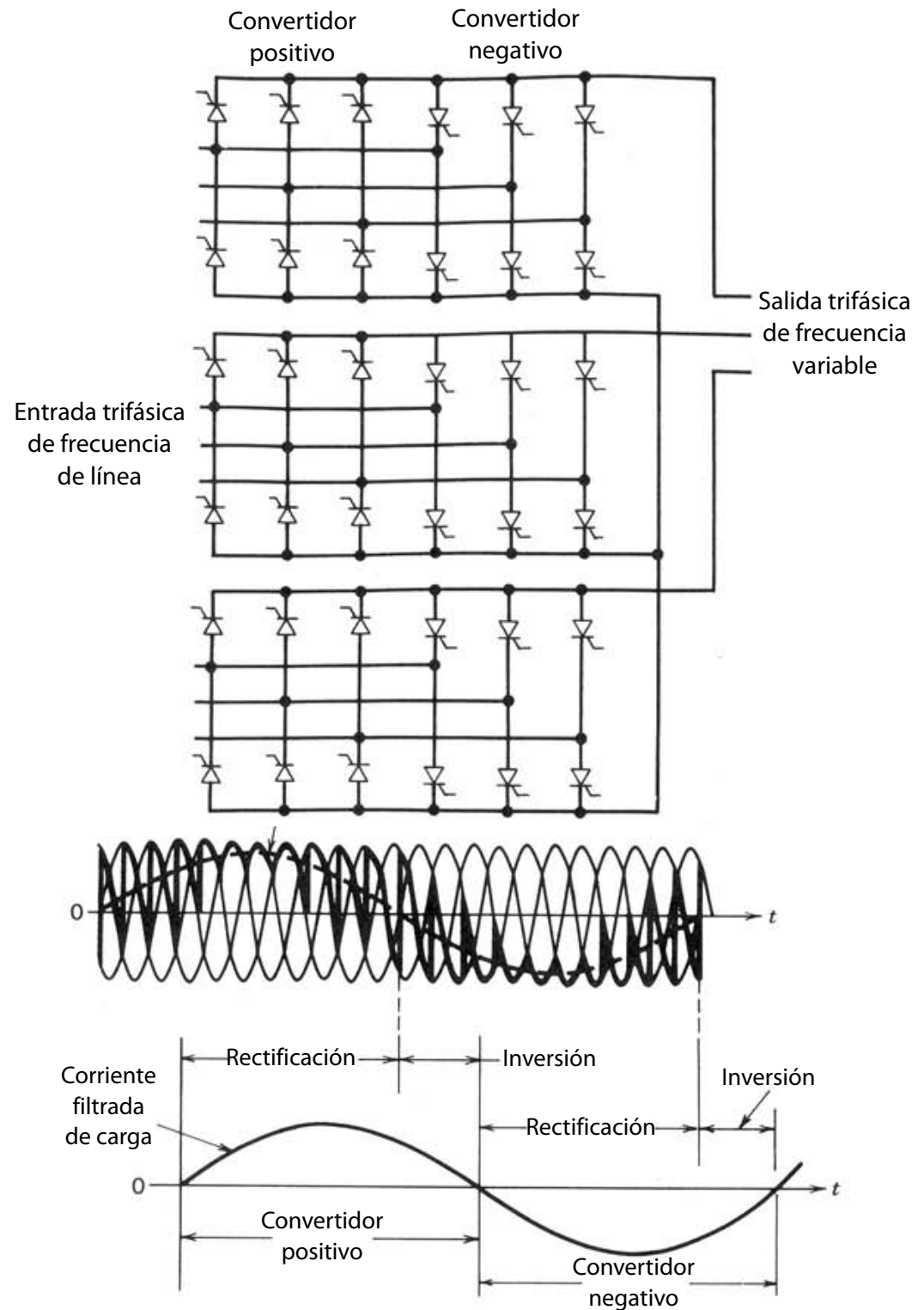
Para aplicaciones de baja velocidad y alta potencia es posible la utilización de cicloconvertidores para controlar la velocidad de motores síncronos o de inducción.

La alimentación de estos se realiza a través de transformadores de aislamiento.

Cada una de las fases de salida consiste en dos convertidores de frecuencia de línea conectados espalda con espalda.

Los ángulos de disparo de los dos convertidores se controlan para que generen una salida senoidal de baja frecuencia.

Como se puede apreciar, el cicloconvertidor no necesita un enlace de CC. La máxima frecuencia de salida de un convertidor es aproximadamente de un tercio de la frecuencia de entrada, con lo cual mantiene un forma de onda aceptable y un contenido armónico bajo.



## **VII SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA.**

7.1 Transmisión de CC en Alto Voltaje.

7.2 Compensadores Estáticos de VAR.

7.3 Interconexión de Fuentes de Energía Renovables y Sistemas de Almacenamiento de Energía al Sistema de suministro.

Bibliografía: Electrónica de Potencia, Mohan 3ed Capítulo 17.

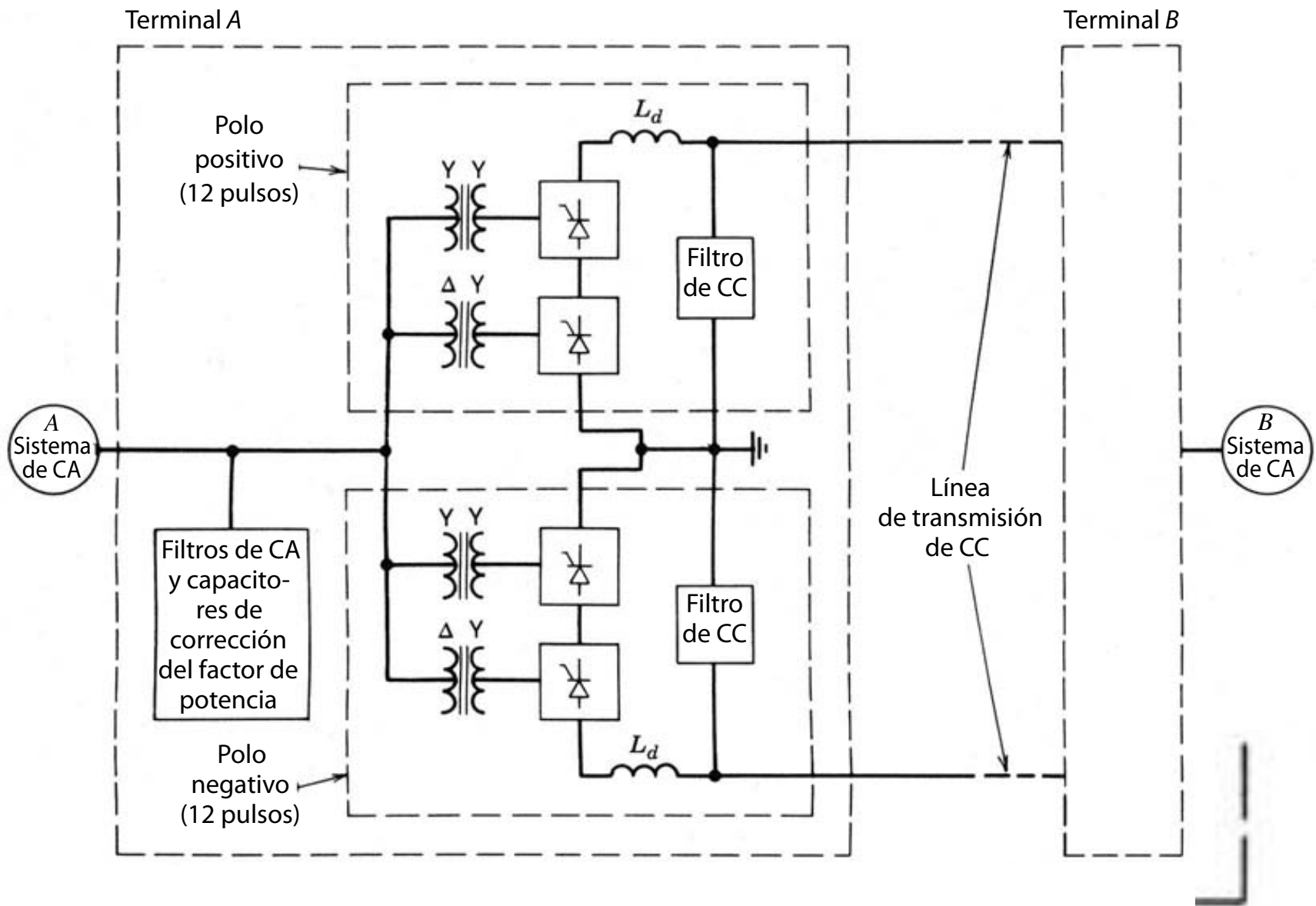
### **7.0 Introducción.**

Conforme los dispositivos de electrónica de potencia y los esquemas han mejorado y evolucionado, incrementando su capacidad para el manejo de tensión y corriente, se han desarrollado aplicaciones en sistemas de suministro de energía, como las transmisión de CC en altas tensiones, compensadores estáticos de VARS y en interconexión de fuentes de energía renovables y de fuentes de almacenamiento con la red de suministro de energía eléctrica.

### **7.1 Transmisión de CC en Alto Voltaje.**

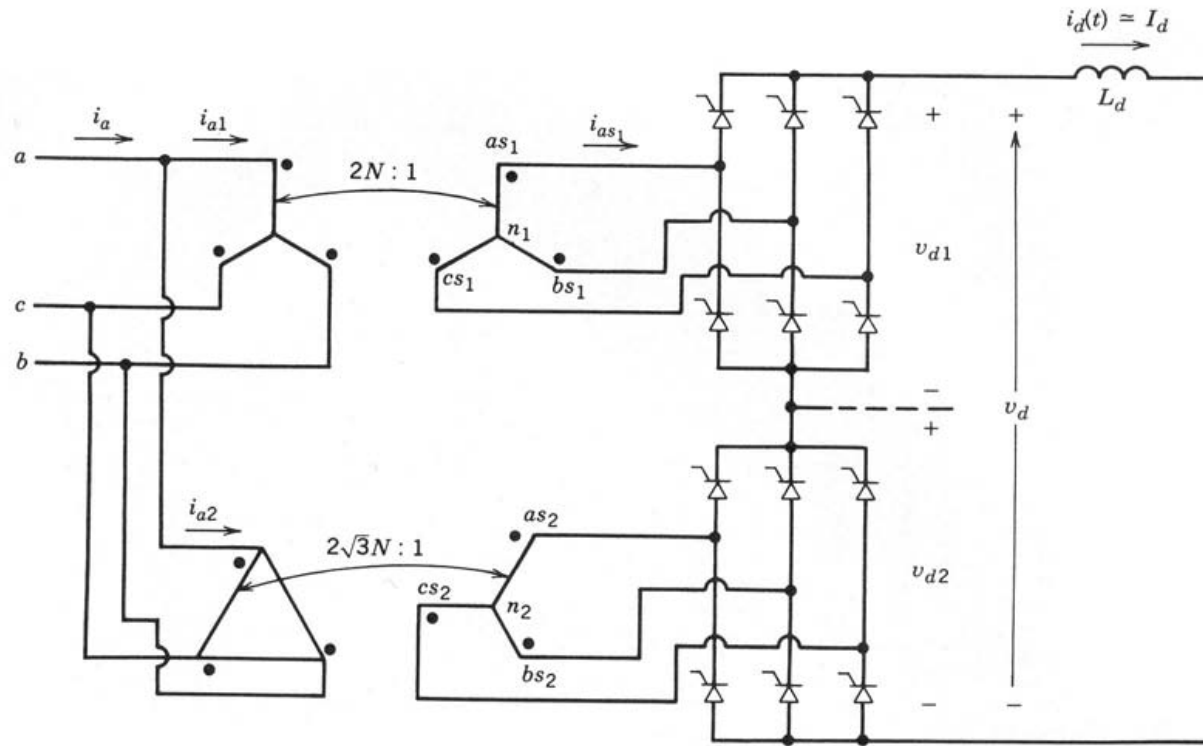
Los sistema de generación tradicionales producen formas de voltaje y corriente en CA; esta energía es enviada a través de líneas de transmisión a los centros de consumo. Sin embargo en determinadas condiciones es preferible transportar la energía a través de líneas de transmisión de CC. Esta opción se vuelve atractiva cuando se requiere transmitir una gran cantidad de potencia a distancias muy grandes, según los estudios, este tipo de sistemas se vuelven rentables en los rangos de distancia de 480-640km o en distancias menores para circuitos sub-acuáticos. Estos sistemas también se utilizan para crear enlaces entre países que operan a distintas frecuencia como es el caso de Reino Unido o inclusive en países como Japón, Tokio Opera a 50Hz y Osaka a 60 Hz. Existen algunas otras características de los sistemas de transmisión de CC que las hacen atractivas:

- Estabilidad mejorada de transitorios.
- Amortiguación dinámica de las oscilaciones del sistema eléctrico.



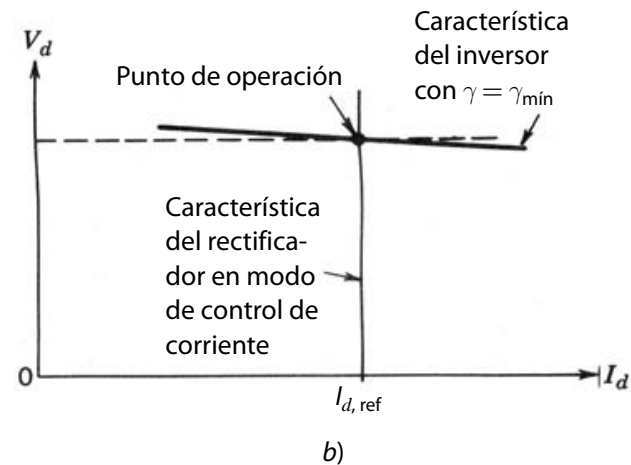
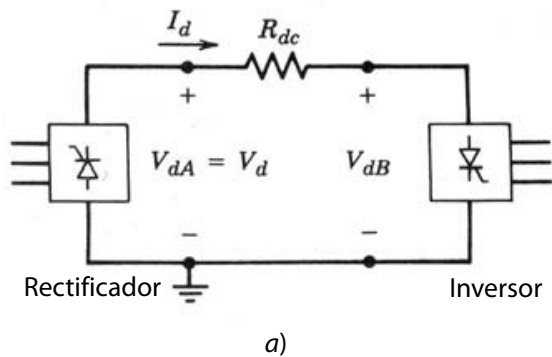


Con el fin de comprender el funcionamiento del sistema de transmisión de CC observemos el funcionamiento del arreglo de 12 pulsos.



Consideraciones:

- Se tiene que considerar que los convertidores de frecuencia de línea conmutados por tensión trabajan con un factor de potencia en atraso, es decir consumen potencia reactiva del sistema de CA.
- Los Sistemas de CA que estén conectados con un enlace HVDC deben contar filtros para eliminar los armónicos asociados a los convertidores.



Para el control de un enlace de HVDC, se toma como factor de control, los voltajes en las Terminales A (Rectificador para este caso) y B (Inversor para este caso) y la magnitud de la corriente que circula por las líneas de transmisión.

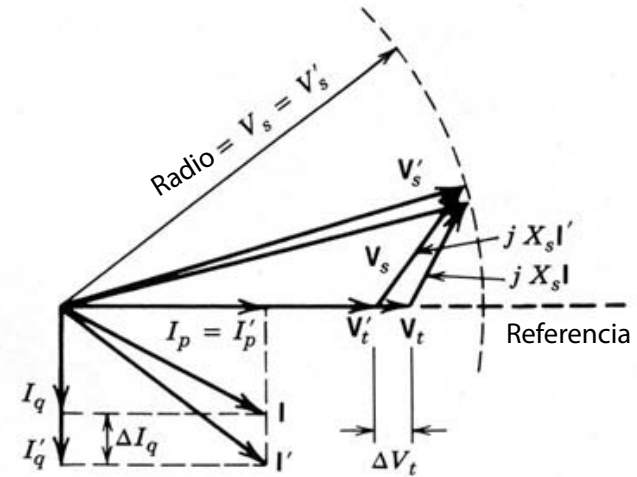
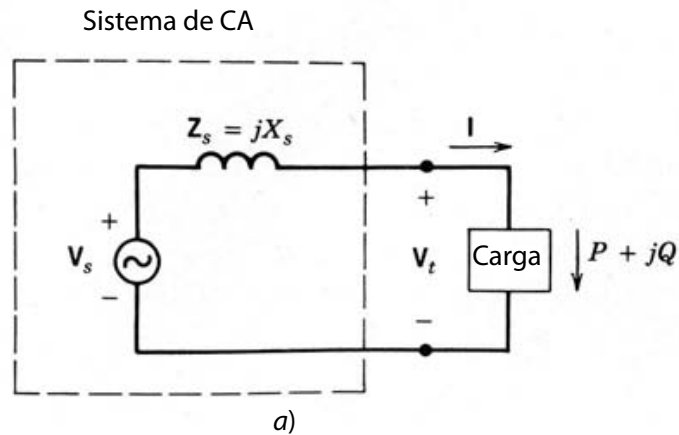
$$I_d = \frac{V_{dA} - V_{dB}}{R_{dc}}$$

## 7.2 Compensadores Estáticos de VAR.

Los dispositivos de tipo VAR (Volts Amperes Reactivos) son necesario en el sistema ya que es deseable regular la tensión dentro de un rango estrecho de su valor nominal; estos sistemas ayudan a mantener la tensión en un rango de +5% a -10% alrededor de los valores nominales.

Ademas en un sistema eléctrico en preferible mantener un carga equilibrada en las tres fases con el fin de eliminar corriente de secuencia negativa y secuencia cero que puedan ocasionar fenómenos de como calentamiento adicional en equipos eléctricos, pulsaciones de par de torsión en generadores y turbinas.

Los sistemas de CA vistos desde el lado de la carga, presentan una impedancia sobre todo inductiva, puesto que las líneas de transmisión, transformadores, generadores; son primordialmente inductivos, es decir que todos estos elementos del sistema eléctrico consumen potencia reactiva y el cambio de este tipo de potencia es uno de los fenómenos que tiene mayor efecto adverso en la regulación de tensión. Por lo cual es de vital importancia el control de la potencia reactiva que esta disponible.



Los compensadores estáticos de VAR proporcionan mediante una conexión electrónica los siguientes beneficios:

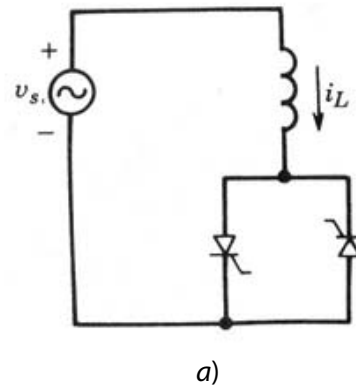
- Un control de respuesta rápida sobre la potencia reactiva.
- Evitan los parpadeos de tensión causados por cargas industriales como hornos de arco.
- Controlan el desequilibrio fluctuante entre las 3 fases ocasionado por el tipo de carga del tipo anterior.
- Proporcionan una regulación dinámica de tensiones con el fin de aumentar la estabilidad de la interconexión entre dos sistemas de CA.

Existen diversos tipos de compensadores estáticos de VAR's, entre los principales se encuentran:

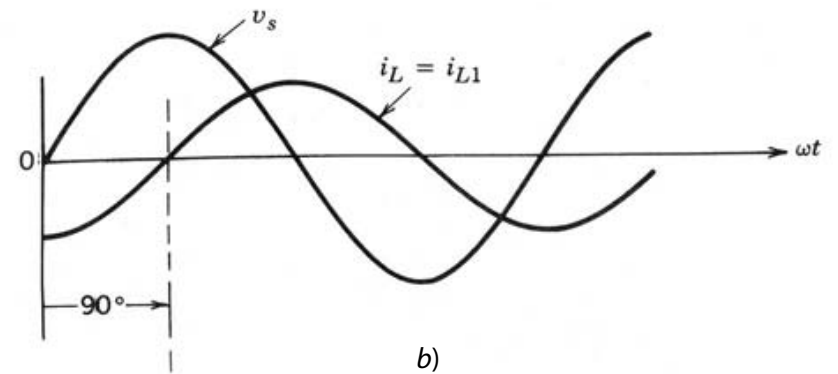
- A. TCI's** (Thyristor-Controlled Inductors) Inductores controlados por tiristores.
- B. TSC's** (Thyristor-Switched Capacitors) Condensadores conmutados por tiristores.
- C.** Convertidores de conmutación con elementos de almacenamiento mínimo de energía.
- D.** Arreglos híbridos de TCI's con TSC's (reducen las pérdidas sin carga).

## TCI's

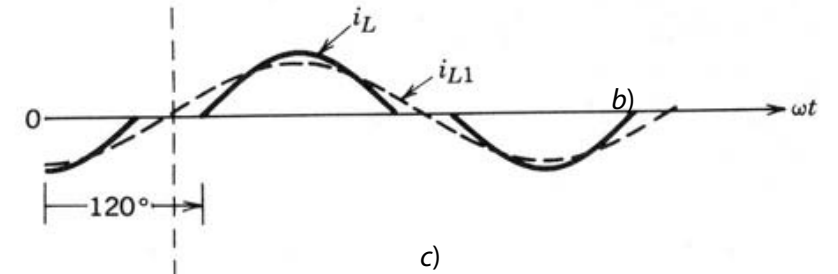
- Este tipo de compensador actúan como inductores variables, donde los VAR's inductivos alimentados varían muy rápido; según las condiciones del sistema, este podría requerir de VAR's inductivos o capacitivos, esto se logra con la conexión en paralelo de un banco de condensadores.



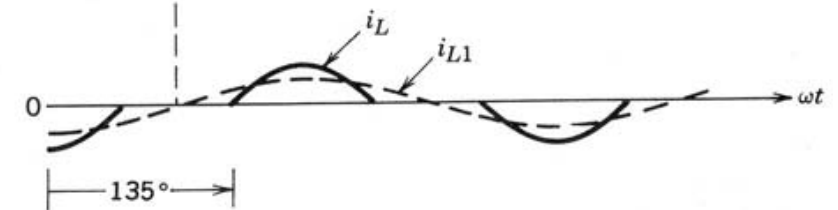
- Para  $0 < \alpha < 90^\circ$  la forma de onda no cambia es decir  $i_L = i_{L1}$  (fundamental).



- Para  $\alpha > 90^\circ$  la magnitud de  $i_L$  disminuye, por lo que se obtiene un control de sobre el valor efectivo de la inductancia conectada.



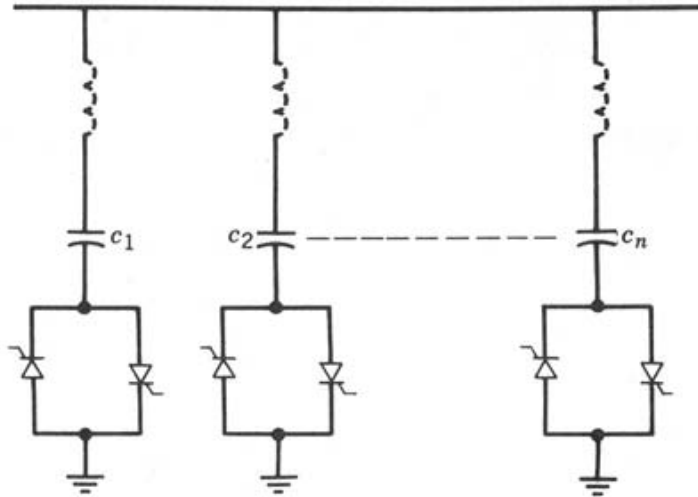
- La operación del TCI's intro-duce armónicos impares de orden 3,5,7,9,11,13, ... Por está razón se conectan TCI's trifásicos en delta, de manera que los armónicos circulen en la delta y no fluyan hacia el sistema de CA.



- El capacitor conectado en paralelo con el TCI's proporciona los VAR necesarios y filtra los armónicos de alta frecuencia.

## TSC's

Sistema de CA



- La conexión se realiza también a través de un interruptor bidireccional.

- Los TSC's emplean el control integral de semi-ciclos donde el condensador está completamente fuera o completamente dentro del circuito.

- El banco de condensadores se apaga mediante el bloqueo de los pulsos de compuerta en ambos tiristores.

- El momento de encendido del TSC's debe ser exacto, en el valor máximo de tensión de CA para evitar grandes diferencias de potencial; con ello ocasionando sobre-intensidades.

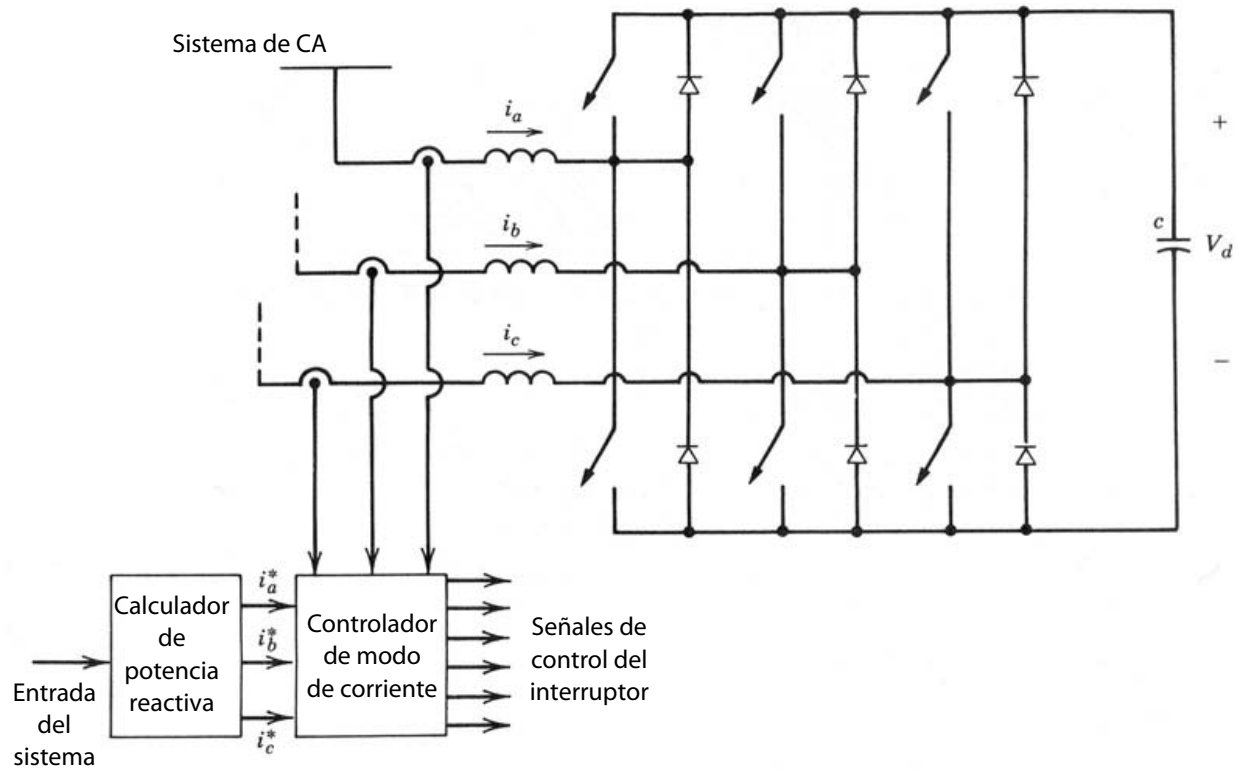
- Se utilizan inductores para limitar las sobre-intensidades durante el encendido.

Convertidores de conmutación con elementos de almacenamiento mínimo de energía.

En este tipo de VAR la corriente de CA de estos convertidores de modo conmutado se controla rápidamente tanto en magnitud como en su relación de fases (en adelante o en atraso) con las tensiones de CA.

Se desea que la potencia promedio consumida o alimentada por estos convertidores sea igual a cero, por lo cual, no se necesita una fuente de CC en la entrada de CC del convertidor; será suficiente con un condensador de

almacenamiento mínimo de energía y su tensión de CC se mantiene constante gracias al convertidor de modo conmutado que transfiere la potencia real suficiente desde el sistema de CA para compensar sus propias pérdidas y mantener la tensión de CC constante a través de su condensador además de controlar los VAR.



### 7.3 Interconexión de Fuentes de Energía Renovables y Sistemas de Almacenamiento de Energía al Sistema de suministro.

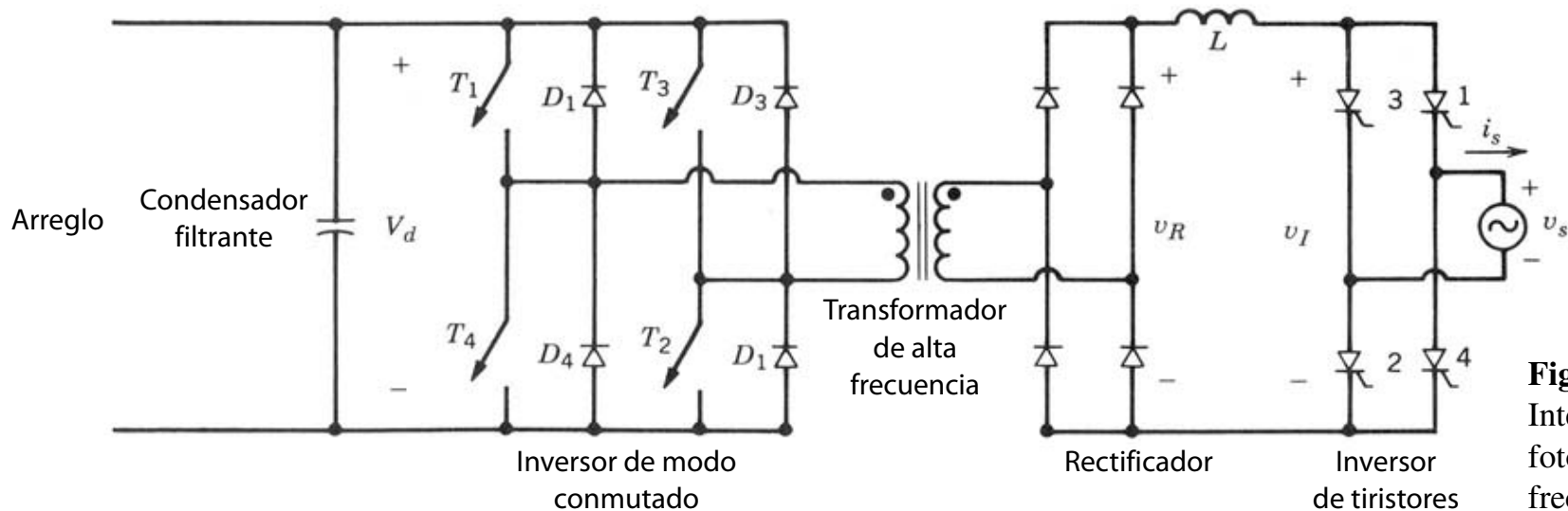
Algunas de las fuentes de energía renovables presentan un alto índice de variabilidad en la magnitud de la potencia que son capaces de generar, por ello es necesario que se utilicen sistemas de interconexión para poder sincronizarlos con la red eléctrica.

Sistemas Fotovoltaicos:

Los sistemas fotovoltaicos se operan intentando que estén siempre en la condición de máxima potencia, esto ocurre en el punto en el que la corriente es máxima al voltaje de operación ideal. Idealmente se debe consumir una corriente de CC del arreglo solar, aunque la reducción de potencia alimentada no es muy grande, ni siquiera en presencia de una cantidad muy grande de corriente de rizado. Por ejemplo, una corriente con un pico de rizado máximo de 5% produce una reducción de potencia de menos del 1%.

Para asegurar que el arreglo continúe operando en el punto de potencia máxima se emplea el método de perturbar y ajustar (técnica de Tramado), mediante el cual se perturba la cantidad de potencia consumida en intervalos regulares (una vez cada pocos segundos) y se observa la potencia de salida que resulta.

Interconexión Monofásica.

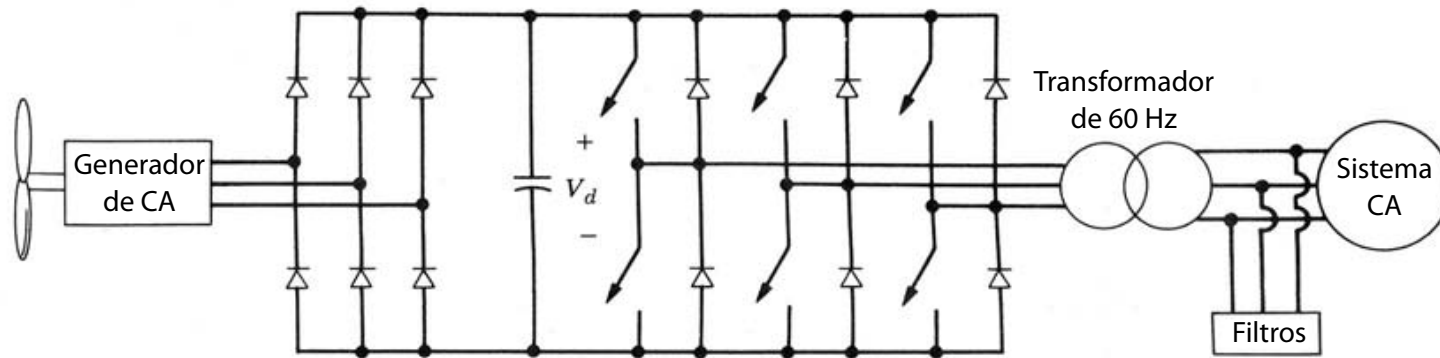


**Figura 17-13**  
Interconexión  
fotovoltaica de alta  
frecuencia.

## Interconexión de Sistemas de Generación eólica e hidro-generación de pequeña escala.

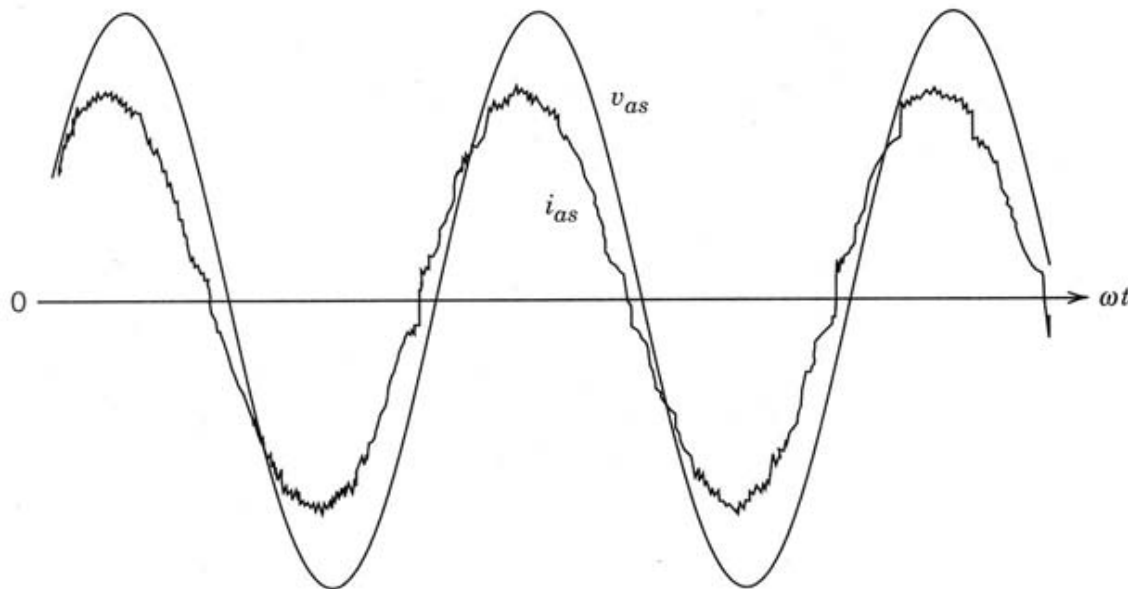
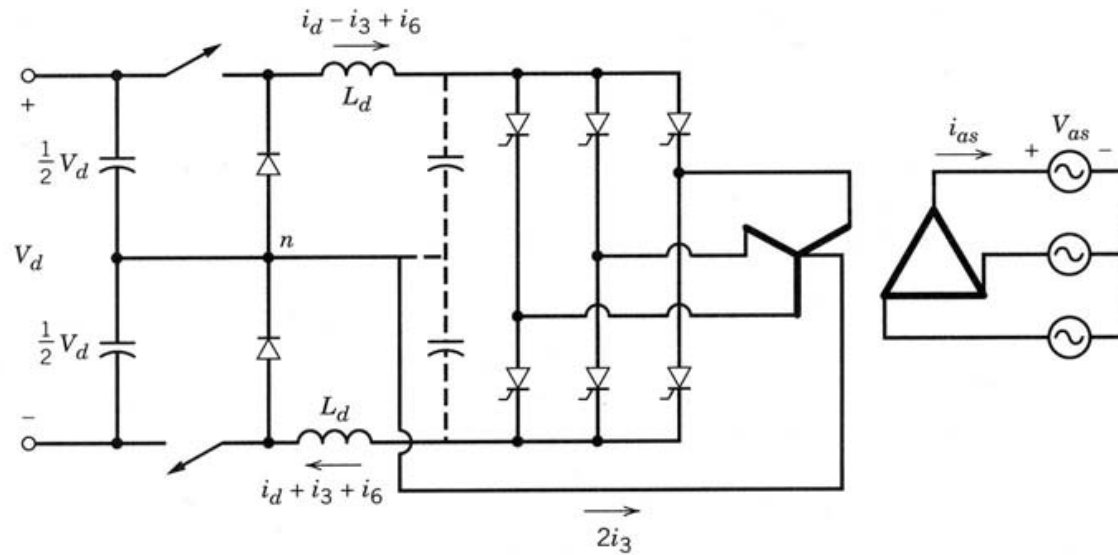
En el caso de las plantas eólicas, la potencia disponible varía con el cubo de la velocidad del viento. Para una pequeña planta de hidro-generación, la potencia disponible depende de la carga hidrostática y del flujo.

Tanto para las eólicas como para la hidro-generación de pequeña escala, a fin de extraer la máxima cantidad de potencia es deseable permitir la variación de la velocidad de la turbina a través del im amplio rango hasta su valor optimo, según sus características de diseño.





Esquema de interconexión de sistemas de almacenamiento.



La energía eléctrica se almacena en baterías o en forma de campo magnético en un inductor superconductor.

Tanto las baterías como las celdas de combustible producen una tensión de CC. Para su interconexión al sistema se emplean sistemas similares al de los arreglos fotovoltaicos.

La manera mas económica de interconectar grandes inductores superconductores sería utilizar un esquema de 12 pulsos conmutados por línea. Con el control del ángulo, la operación del convertidor puede variar en forma continua desde el modo de rectificador completo (Proceso de carga) hasta el modo de inversor completo (proceso de descarga). Este esquema se muestra en la figura de la izquierda.