

TEMA 1: Introducción a los Sistemas de Potencia

Índice

1.1.- <i>Introducción</i>	1
1.2.- <i>Clasificación de los Sistemas de Potencia</i>	3
1.3.- <i>Campos de Aplicación</i>	5
1.4.- <i>Diferentes visiones de la Electrónica de Potencia</i>	6
1.5.- <i>Componentes de base en la Electrónica de Potencia</i>	11

1.1.- *Introducción.*

Cada vez son más los dispositivos y sistemas que en una o varias de sus etapas son accionados por energía eléctrica. Los accionamientos consisten, en general, en procesos que transforman la energía eléctrica en otro tipo de energía, o en el mismo tipo, pero con diferentes características. Los encargados de realizar dichos procesos son los **Sistemas de Potencia**.

Las aplicaciones de la electrónica estuvieron limitadas durante mucho tiempo a las técnicas de alta frecuencia (emisores, receptores, etc.). En la evolución de la electrónica industrial, las posibilidades estaban limitadas por la falta de fiabilidad de los elementos electrónicos entonces disponibles (tubos amplificadores, tiratrones, resistencias, condensadores). Esta fiabilidad era insuficiente para responder a las altas exigencias que se requerían en las nuevas aplicaciones del campo industrial.

Gracias al descubrimiento de los dispositivos semiconductores (transistores, tiristores, etc.) en la década de los 60, que respondían a las exigencias industriales (alta fiabilidad, dimensiones reducidas, insensibilidad a las vibraciones mecánicas, etc.), la electrónica industrial hizo progresos increíbles, permitiendo la realización de procesos cada vez más complejos, destinados a la automatización de procesos industriales.

En general, cualquier conversión de energía eléctrica se puede realizar por *procedimientos electromecánicos* o por *procedimientos electrónicos*. Los convertidores electrónicos disponen de las siguientes ventajas frente a los electromecánicos:

1. Mayor flexibilidad y más posibilidades de control.
2. Mayor estabilidad y mayor rapidez de respuesta, gracias a las características eléctricas.
3. Menor mantenimiento al no disponer de partes mecánicas.
4. Mayor vida media y mayor fiabilidad.
5. No producción del arco eléctrico.

Como inconvenientes se pueden destacar:

- Menor robustez eléctrica, al disponer de menor capacidad para soportar sobretensiones y sobrecorrientes.
- Mayor coste para algunas de sus aplicaciones.

La mayor **flexibilidad** y **controlabilidad** de los dispositivos electrónicos, hace que se apliquen para resolver procesos cada vez más complejos. Un equipo electrónico de potencia consta fundamentalmente de dos partes, tal como se simboliza en la siguiente figura :

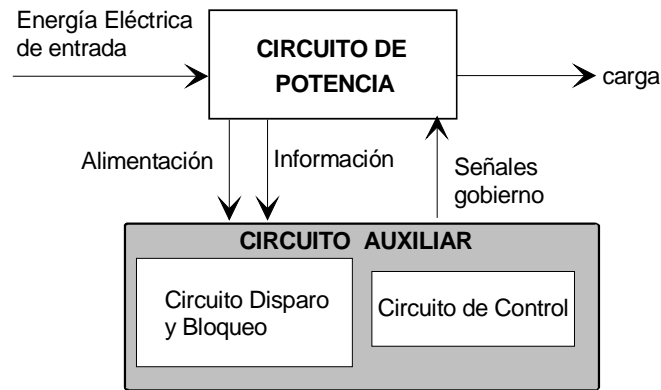
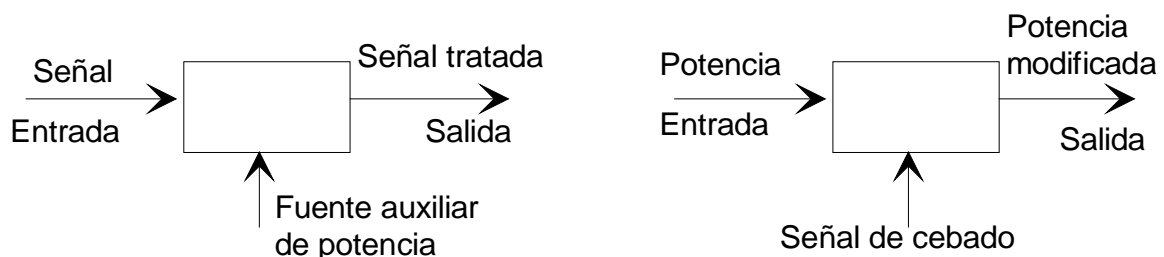


Figura 1.1.- Diagrama de bloques de un Sistema de Potencia.

1. Un circuito de Potencia, compuesto de semiconductores de potencia y elementos pasivos, que liga la fuente primaria de alimentación con la carga.
2. Un circuito de mando, que elabora la información proporcionada por el circuito de potencia y genera unas señales de excitación que determinan la conducción de los semiconductores controlados con una fase y secuencia conveniente.

Antes de pasar al estudio de la electrónica de potencia, interesa resaltar su principal característica, mostrar sus particularidades y situar el campo de aplicación.

En la *Electrónica de Señal* se varía la caída de tensión que un componente activo crea en un circuito habitualmente alimentado en continua. Esta variación permite, a partir de una información de entrada, obtener otra de salida modificada o amplificada. Lo que interesa es la relación entre las señales de entrada y salida, examinando posteriormente la potencia suministrada por la fuente auxiliar que requiere para su funcionamiento. La función de base es la **amplificación** y la principal característica es la **ganancia**.



Electrónica de Señal

Electrónica de Potencia

Figura 1.2.- Característica fundamental de un Sistema electrónico de Señal y de Potencia.

En la *Electrónica de Potencia*, el concepto principal es el **rendimiento**. El elemento de base no puede trabajar en régimen de amplificación pues las pérdidas serían elevadas, es necesario trabajar en régimen de **conmutación**, siendo el componente de base el semiconductor quien trabaja como interruptor. Este componente trabajando en conmutación deberá cumplir las siguientes características:

- Tener dos estados claramente definidos, uno de alta impedancia (bloqueo) y otro de baja impedancia (conducción).
- Poder controlar el paso de un estado a otro con facilidad y con pequeña potencia de control.
- Ser capaz de soportar altas tensiones cuando está bloqueado y grandes intensidades, con pequeñas caídas de tensión entre sus extremos, cuando está en conducción.
- Rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro.

Así podemos definir la Electrónica de Potencia de la siguiente manera:

TEMA 1 : Introducción a los Sistemas de Potencia

Electrónica de Potencia es la parte de la Electrónica encargada del estudio de dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica.

Por tanto la Electrónica de Potencia se ha introducido de lleno en la industria en aplicaciones tales como las fuentes de alimentación, cargadores de baterías, control de temperatura, variadores de velocidad de motores, etc. Es la **Electrónica Industrial** quien estudia la adaptación de sistemas electrónicos de potencia a procesos industriales. Siendo un sistema electrónico de potencia aquel circuito electrónico que se encarga de controlar un proceso industrial, donde interviene un transvase y procesamiento de energía eléctrica entre la entrada y la carga, estando formado por varios convertidores, transductores y sistemas de control., los cuales siguiendo hoy en día evolucionando y creciendo constantemente.

El campo de la Electrónica de Potencia puede dividirse en grandes disciplinas o bloques temáticos:

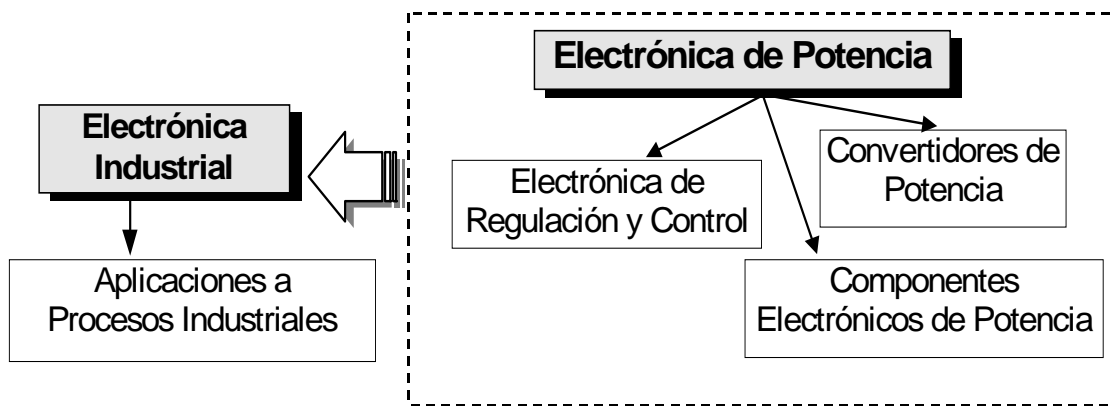


Figura 1.3.- Bloques temáticos que comprende la Electrónica de Potencia

Nosotros trataremos el estudio de los convertidores de potencia y la apropiada selección de las señales de gobierno que deben proporcionar el circuito de mando.

1.2.- Clasificación de los Sistemas de Potencia.

Los sistemas electrónicos de potencia consisten en uno o más convertidores de potencia, que gobiernan la transferencia de energía. El convertidor es el módulo básico en un sistema de potencia. En general, un convertidor controla y moldea la magnitud eléctrica de entrada V_i , frecuencia f_i y número de fases m_i , en una magnitud eléctrica de salida V_o , frecuencia f_o y número de fases m_o . La potencia puede fluir de forma reversible, intercambiándose los papeles entre la entrada y la salida.

Es un hecho que la Electrónica de Potencia es una disciplina emergente dentro de la Electrónica. Su utilización se extiende de forma amplia en sectores tales como el residencial, la industria, sector aerospacial o militar. Recientemente el papel de la electrónica de potencia ha venido ganando con un especial significado en relación a la conservación de la energía y el control del medio ambiente. La realidad es que la demanda de energía eléctrica crece con relación directa a la mejora de la calidad de vida.

La concepción de esta asignatura está basada en la descripción de los principales sistemas que se encargan de procesar la energía eléctrica. Dado que el desarrollo de esta disciplina es constante, debido fundamentalmente a que está ligada al crecimiento del campo de aplicación y a la mejora de las prestaciones de los semiconductores de potencia, nuestro objetivo es presentar las estructuras de los convertidores estáticos, sus características y sus campos de aplicación. De esta forma se pretende ser capaz de determinar la manera de transformar la "presentación" de la energía eléctrica y por tanto, de seleccionar y diseñar la estructura de potencia más conveniente para cada

caso. De manera que se realice, mediante el citado sistema de potencia, la conversión energética de la manera más eficaz posible.

De manera general se puede abordar el estudio de los distintos convertidores en función de los cuatro tipos de conversión posibles:

1. Conversión alterna-continua.
2. Conversión alterna-alterna.
3. Conversión continua-alterna.
4. Conversión continua-continua.

Desde el punto de vista real, dado que el funcionamiento del sistema encargado de transformar el tipo de "presentación" de la energía eléctrica viene condicionado por el tipo de energía disponible en su entrada, hemos adoptado como criterio para la estructuración del programa de la asignatura : Clasificar los convertidores estáticos de energía en función del tipo de energía eléctrica que los alimenta, tal y como se muestra en la siguiente figura:

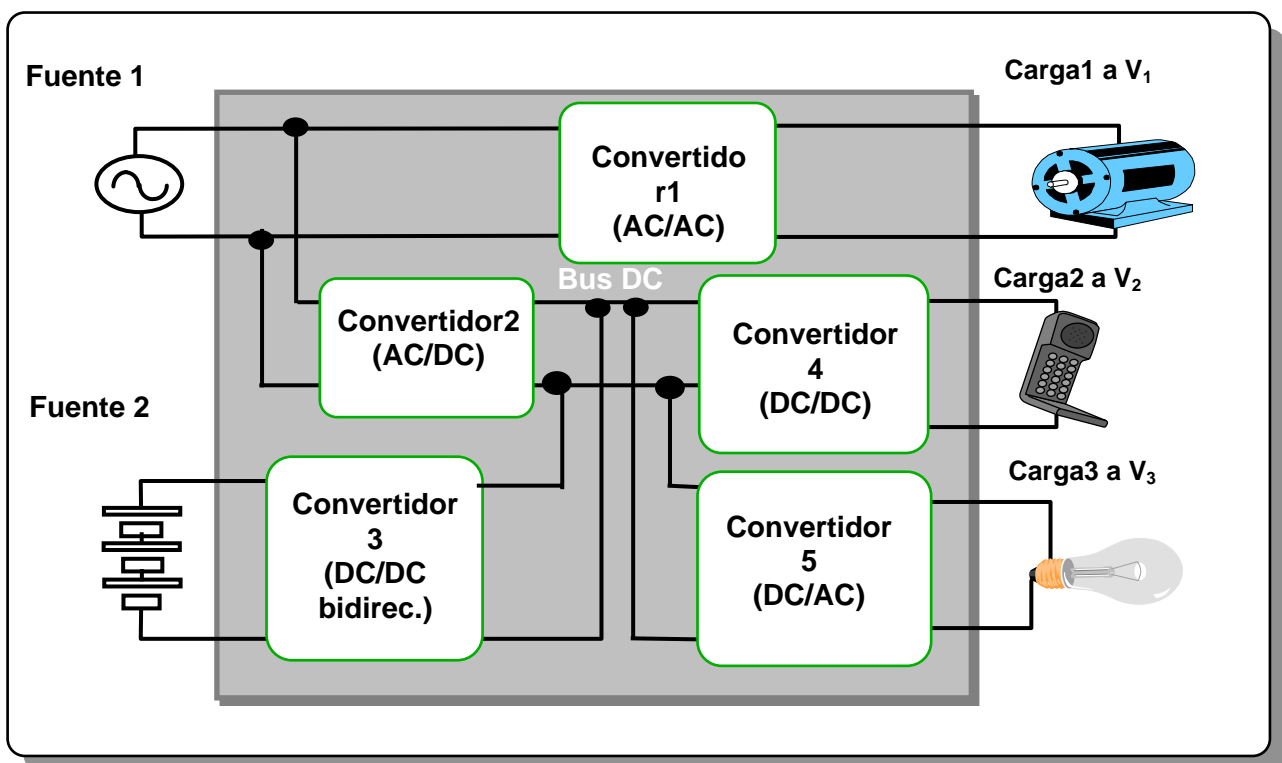
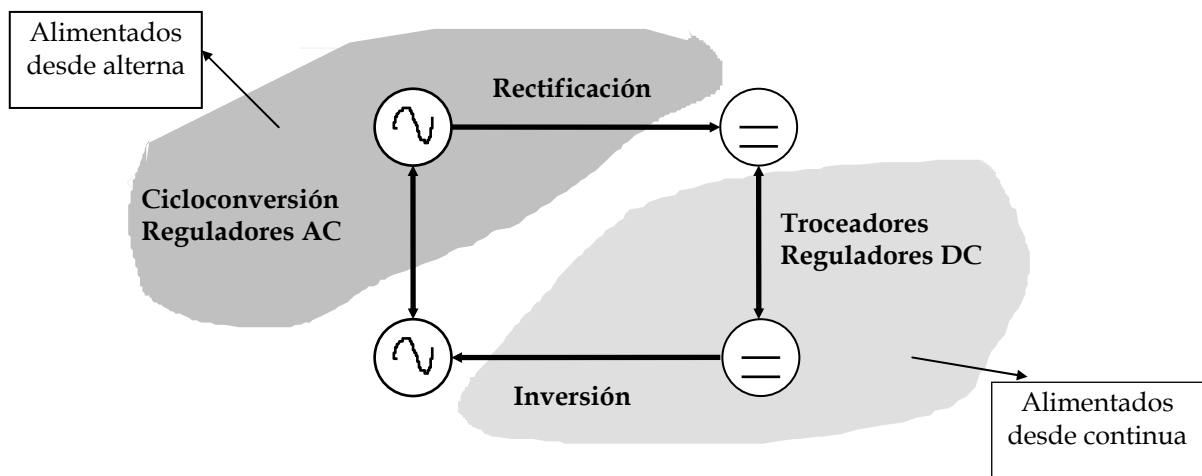


Figura 1.4.- Clasificación y ejemplo de los convertidores estáticos de energía eléctrica.

TEMA 1 : *Introducción a los Sistemas de Potencia*

Existen muchos tipos de clasificaciones, las cuales incluyen como características determinantes :

- El tipo de semiconductor utilizado.
- ###El modo de conmutación
- ###El tipo de aplicación.

Ahora, atendiendo **al tipo de conmutación** se obtiene la siguiente clasificación de convertidores de potencia:

Conmutación natural: Cuando la fuente de tensión primaria, presente a uno de los lados del convertidor, facilita el paso a corte de los semiconductores. Además dichos semiconductores pasan a conducción en fase con la frecuencia de la tensión de entrada. (Rectificadores, Reguladores de corriente alterna y Cicloconvertidores).

Conmutación forzada: Cuando los conmutadores controlables son llevados a corte y a conducción a frecuencias mayores que la frecuencia de la red. (Troceadores, Inversores y Onduladores autónomos).

De las clasificaciones anteriores se pueden extraer las características básicas de cada uno de los convertidores mencionados:

a).- **Rectificador no controlado:** Transforma la corriente alterna de voltaje constante en corriente continua de voltaje constante. Formado por diodos, constituyen montajes irreversibles.

b).- **Rectificador controlado:** Transforma la corriente alterna de voltaje constante en corriente continua de voltaje variable. Formado por tiristores. El montaje puede ser reversible, denominándose **inversor no autónomo**.

c).- **Reguladores de AC:** Transforman la corriente alterna de voltaje constante en corriente alterna de voltaje variable y de la misma frecuencia

d).- **Cicloconvertidores:** Reguladores de alterna o convertidores directos alterna/alterna de distinta frecuencia.

e).- **Ondulador autónomo o Inversor:** Transforman una corriente continua en corriente alterna de frecuencia fija o variable.

f).- **Troceador o "chopper":** Transforma corriente continua de voltaje constante en corriente continua de voltaje variable.

1.3.-Campos de Aplicación.

En general los sistemas de potencia se utilizan para accionar cualquier dispositivo que necesite una entrada de energía eléctrica distinta a la que suministra la fuente de alimentación primaria. Veamos a continuación algunas de las aplicaciones industriales de cada uno de los convertidores:

Rectificadores:

- Alimentación de todo tipo de sistemas electrónicos, donde se necesite energía eléctrica en forma de corriente continua.
- Control de motores de continua utilizados en procesos industriales: Máquinas herramienta, carretillas elevadoras y transportadoras, trenes de laminación y papeleras.
- Transporte de energía eléctrica en c.c. y alta tensión.
- Procesos electroquímicos.
- Cargadores de baterías.

Reguladores de alterna:

- Calentamiento por inducción.
- Control de iluminación.
- Equipos para procesos de electrodeposición.

Cambiadores de frecuencia:

- Enlace entre dos sistemas energéticos de corriente alterna no sincronizados.
- Alimentación de aeronaves o grupos electrógenos móviles.

Inversores:

- Accionadores de motores de corriente alterna en todo tipo de aplicaciones industriales.
- Convertidores corriente continua en alterna para fuentes no convencionales, tales como la fotovoltaica o eólica
- Calentamiento por inducción.
- SAI

Troceadores:

- Alimentación y control de motores de continua.
- Alimentación de equipos electrónicos a partir de baterías o fuentes autónomas de corriente continua.

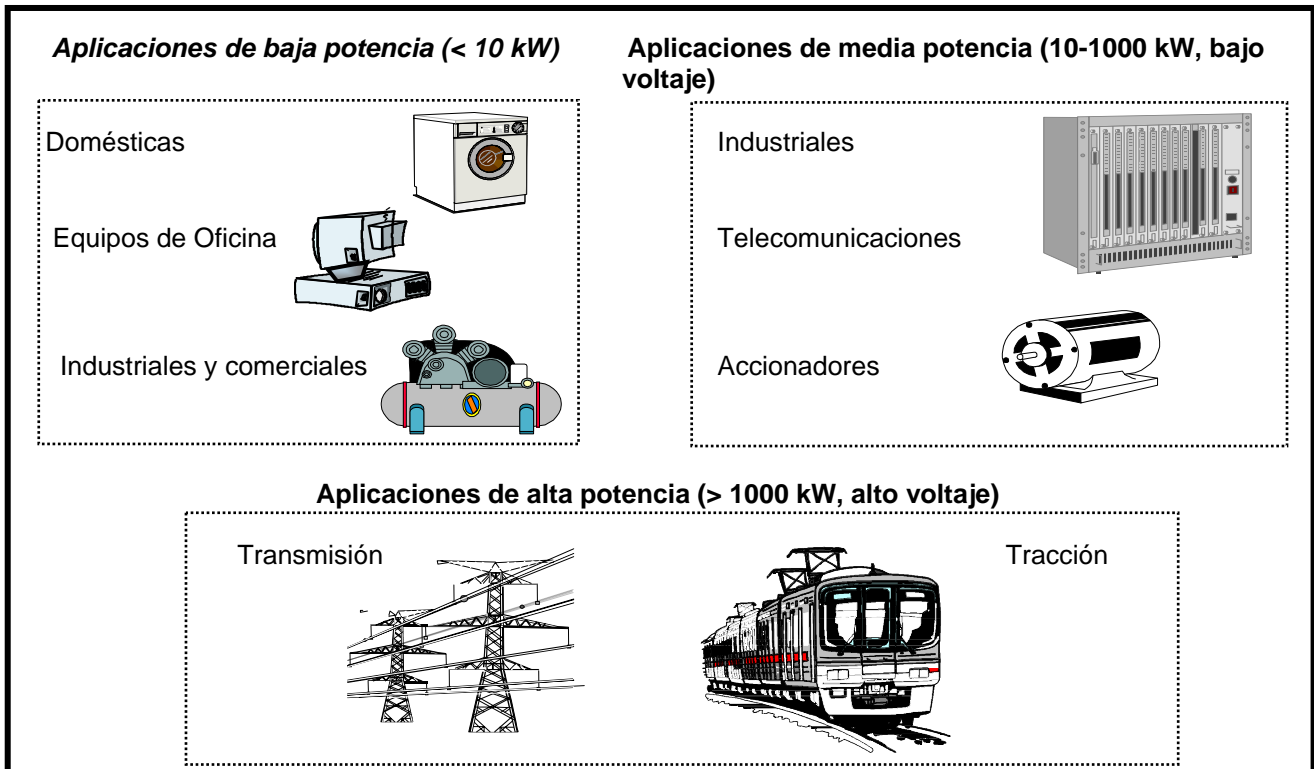


Figura 1.5.- Aplicaciones de los dispositivos de potencia.

1.4.- Diferentes visiones de la Electrónica de Potencia

Visión Histórica.

Veamos un resumen de los hitos históricos que han marcado la evolución de la electrónica. Ciertamente hay un enorme espectro de ellos pero todos tienen un factor común: todos los equipos, sistemas, etc., procesan señales eléctricas que pueden ser analógicas o digitales, de baja o alta frecuencia etc., pero siempre señales eléctricas. Según comentábamos en páginas anteriores, el concepto de Electrónica distinguía dos ramas: La primera estudiaba el procesamiento de señales eléctricas y los dispositivos asociados y la segunda estaba dedicada al estudio del procesamiento de la

TEMA 1 : Introducción a los Sistemas de Potencia

potencia eléctrica y los dispositivos asociados (concepto de Electrónica del primer número de la revista "Radiactividad y Electrónica", era la primera vez en la historia en la que la palabra Electrónica daba título a una revista).

La electrónica de potencia representa alrededor de un 15% de la totalidad del mercado electrónico y un 35% del consumo de energía eléctrica en EE.UU. es procesada mediante circuitos electrónicos de potencia y un 25% en la RFA. La Electrónica de potencia se desarrolla fundamentalmente a partir del nacimiento del tiristor. A partir de esa fecha los conceptos electrotécnicos se convierten en electrónicos. Se desarrollan entre los años 1965 y 1980 gran cantidad de convertidores para el procesamiento de la potencia eléctrica basados en este dispositivo. Cabe agrupar los desarrollos en este sentido en convertidores AC/DC (rectificadores controlados), convertidores DC/AC y AC/AC (inversores), y convertidores DC/DC (choppers de potencia).

A partir de los años 1980 se produce un fuerte incremento de la penetración en el mercado de equipos de potencia debido fundamentalmente a la incorporación por parte de estos de otros nuevos elementos de potencia como el transistor, MOSFET, IGBT, que permiten mayores frecuencias de conmutación y consecuentemente la reducción del tamaño de los equipos. El tiristor sigue ocupando a pesar de todo un lugar preferente para las altas potencias (mayores de 500 KW).

La siguiente figura muestra un resumen de la evolución histórica de la Electrónica de Potencia.

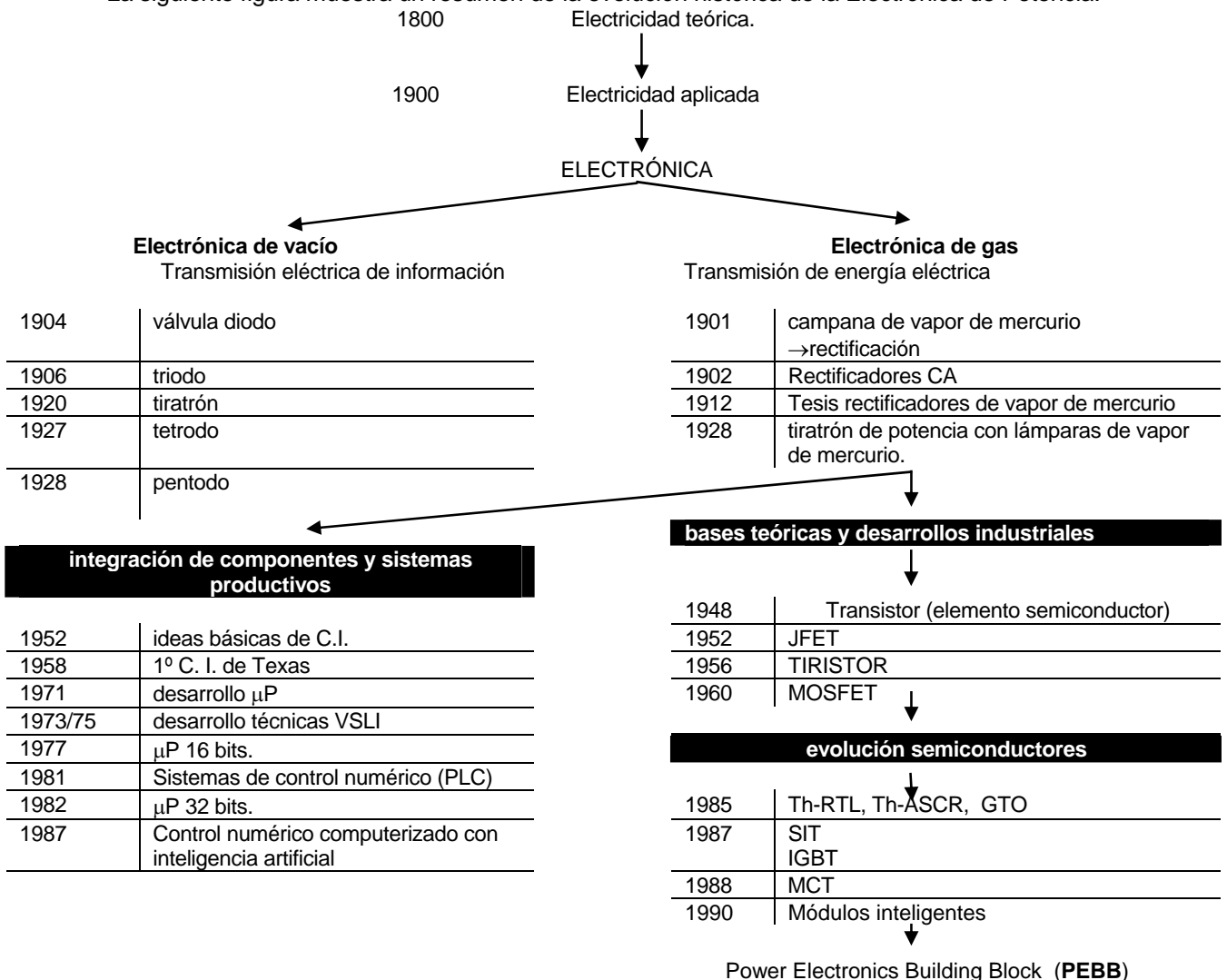


Figura 1.6.- Síntesis histórica de los dispositivos semiconductores para tratamiento de señales y para el procesamiento de la potencia eléctrica

Visión Actual.

La industria de electrónica ha jugado un importante papel en el desarrollo industrial desde la II Guerra Mundial. Los sistemas electrónicos se utilizan en un amplio abanico de aplicaciones. Desde las telecomunicaciones y el procesamiento de información en medicina a los sistemas de transporte, en realidad tienen el potencial de impactar en cualquier área de la industrial mundial y de la actividad social.

En las puertas del siglo veintiuno, las tecnologías asociadas con la manipulación y conservación de las fuentes energéticas son de vital importancia, para asegurar un estándar de vida confortable. La electrónica de potencia se refiere, generalmente, a la utilización eficaz de la energía eléctrica. La industria de electrónica de potencia ofrece una importante oportunidad de integrar las tecnologías para la conservación de la energía con el progreso de nuestro entorno, tanto en los procesos de fabricación como en los de aplicación de los productos electrónicos de potencia.

La variación de la velocidad en los motores eléctricos puede ser lograda sin una pérdida apreciable de eficiencia mediante la utilización de un inversor electrónico de potencia de frecuencia variable. Esta tecnología es emergente actualmente ante la necesidad de proporcionar potencia y control a los motores en los futuros coches eléctricos. Sistemas de control de velocidad variable son la razón del ahorro energético y deben jugar un importante papel en la manipulación en la demanda de energía, de diversos sistemas industriales. La llave que posibilita dicha tecnología es la utilización del transistor bipolar de puerta aislada ó IGBT.

Aunque el control de motores es una aplicación importante, el impacto de la electrónica de potencia puede verse en el día a día de la sociedad. Algunas de las principales aplicaciones de la electrónica de potencia son: las fuentes de alimentación, procesos electro-químicos, control de calor y de iluminación, conversión foto-voltaica, aplicaciones médicas, etc.

El crecimiento de la microelectrónica en las últimas tres décadas ha sido un fenómeno a destacar. Hoy en día, el mercado comercial para los circuitos integrados con una muy alta escala de integración (VLSIC's) es mayor de 1000 millones de dólares, y constituye más del 80% del total de la venta de semiconductores. Las emergentes aplicaciones en comunicación y en procesamiento de potencia van a revolucionar los medios de transporte, las comunicaciones, el procesamiento de la información, el acondicionamiento de potencia y las industrias de computación. Para restringir la disipación de potencia, estos chips deberán trabajar con tensiones de alimentación muy reducidas, en el rango de 1V. La electrónica de potencia, debe jugar un importante papel en la consecución de la próxima generación de convertidores de muy baja potencia y muy alto rendimiento que acompañaran a las tecnologías emergentes de computación, comunicaciones y procesamiento de la potencia.

Ante la expectativa creada en la actualidad, dada la necesidad de avance tecnológico, la electrónica de potencia junto con los rápidos sistemas de control proporcionan una oportunidad de crear un sistema flexible que pueda responder al amplio espectro de aplicaciones en los sistemas de potencia. Los sistemas electrónicos de potencia pueden utilizarse para regular tensión, adecuar las exigencias de potencia para controlar cargas, alimentar motores, así como para muchas más aplicaciones actuales y futuras. Para conseguir este objetivo, se necesitan desarrollos futuros en componentes de conmutación, circuitos y sistemas de control. En la siguiente figura se muestran las principales tecnologías emergentes y sus aplicaciones.

TEMA 1 : Introducción a los Sistemas de Potencia

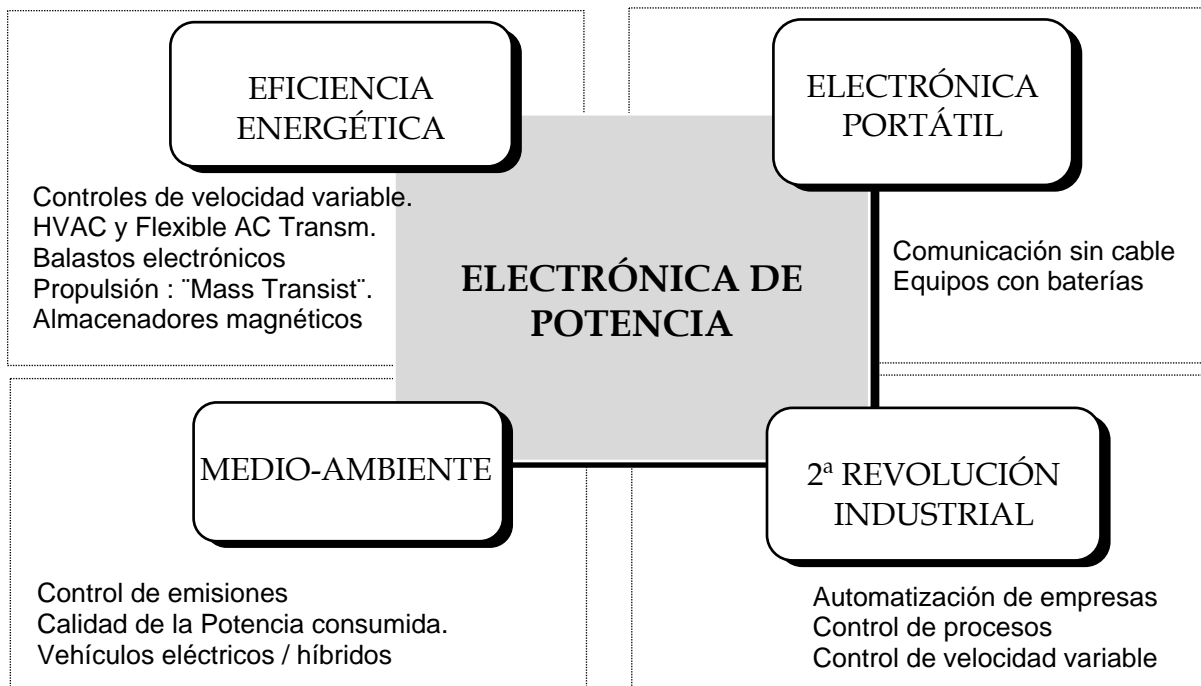


Figura 1.7.- Tecnologías y aplicaciones emergentes, donde interviene la electrónica de potencia.

A continuación expondremos algunos de los criterios más relevantes de varios autores especializados en la disciplina de la Electrónica de Potencia. Ello permitirá contrastar diferentes criterios que sobre esta materia se tiene en la actualidad con objeto de identificar más el concepto de Electrónica de Potencia.

Muhammad H. Rashid en su libro "Power Electronics Circuits, Devices and Applications" (Prentice Hall 1993) considera que la Electrónica de Potencia combina potencia, electrónica y control. El Control se ocupa de las características estáticas y dinámicas de los sistemas en lazo cerrado. La Potencia se encarga de los sistemas de potencia móviles y estáticos para la generación, transmisión y distribución de la potencia eléctrica. Por último la Electrónica trata con los componentes de estado sólido y circuitos para el tratamiento de señales con el objetivo de obtener el control necesario. Por tanto **Electrónica de Potencia se puede definir como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y conversión de la potencia eléctrica.**

Ned Mohan, Tore M. Undeland y William P. Robbins en su libro "Power Electronics. Converters, Applications and Design" (John Wiley & Sons, 1995) definen la tarea de la Electrónica de Potencia al procesamiento y control de la energía eléctrica suministrando voltajes y corrientes en la manera más óptima para ser utilizada por diferentes cargas. Con esta visión, se consigue dar cuenta de los diferentes procesos a los que puede verse sometida la energía eléctrica en función de las exigencias de las diferentes cargas que necesiten de dicha energía para realizar un trabajo.

Joseph Vithayathil en su libro "Power Electronics. Principles and Applications", (McGraw-Hill 1995) define a la Electrónica de Potencia como la tecnología que liga la potencia eléctrica con la electrónica.

Bimal K. Bose en la introducción del texto "Power Electronics and Variable Frequency Drives"(IEEE Press 1996) menciona como **la Electrónica de Potencia combina la conversión y el control de la potencia eléctrica para diversas aplicaciones**, tales como fuentes de alimentación reguladas AC y DC, control de iluminación y calefacción, soldadura eléctrica, procesos electroquímicos, calentamiento por inducción, control de máquinas DC y AC, etc.

La evolución en Electrónica de Potencia a través de los años, ha desembocado en el concepto actual de la disciplina Electrónica de Potencia como la síntesis de múltiples disciplinas tecnológicas, tal como aparece en la siguiente figura.

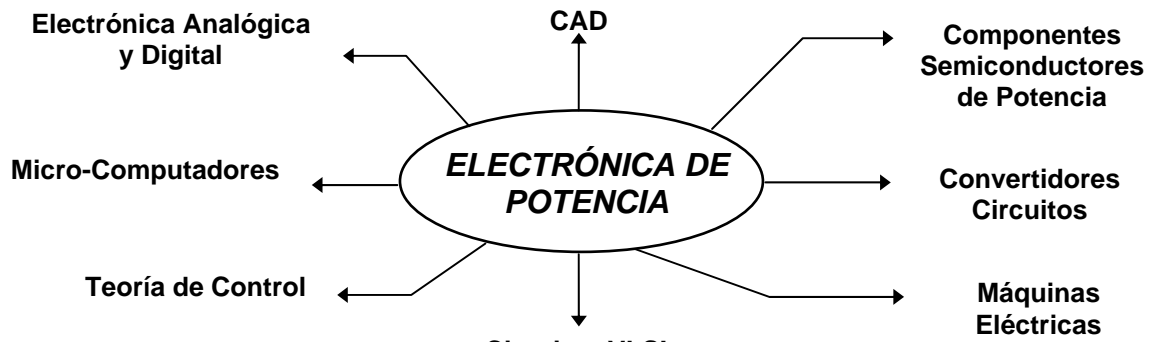


Figura 1.8.- Electrónica de Potencia una tecnología interdisciplinar.

Visión Interdisciplinar

Veamos a continuación cual es la relación de la Electrónica de Potencia con las principales áreas que forman la Electrónica. Para ello realizaremos esta visión interdisciplinar empezando por definir los distintos niveles estructurales que comprende la Electrónica.

El estudio de la Electrónica pretende alcanzar, como objetivo final, los conocimientos necesarios para poder realizar e interpretar sistemas electrónicos. Estos últimos deberán realizar unas funciones específicas en un proceso determinado. Para alcanzar dicho objetivo, es decir, realizar e interpretar un sistema, la Electrónica se subdivide en niveles estructurales o bloques fundamentales que se sustentan cada uno de ellos sobre el anterior, dichos niveles se muestran en la siguiente figura.

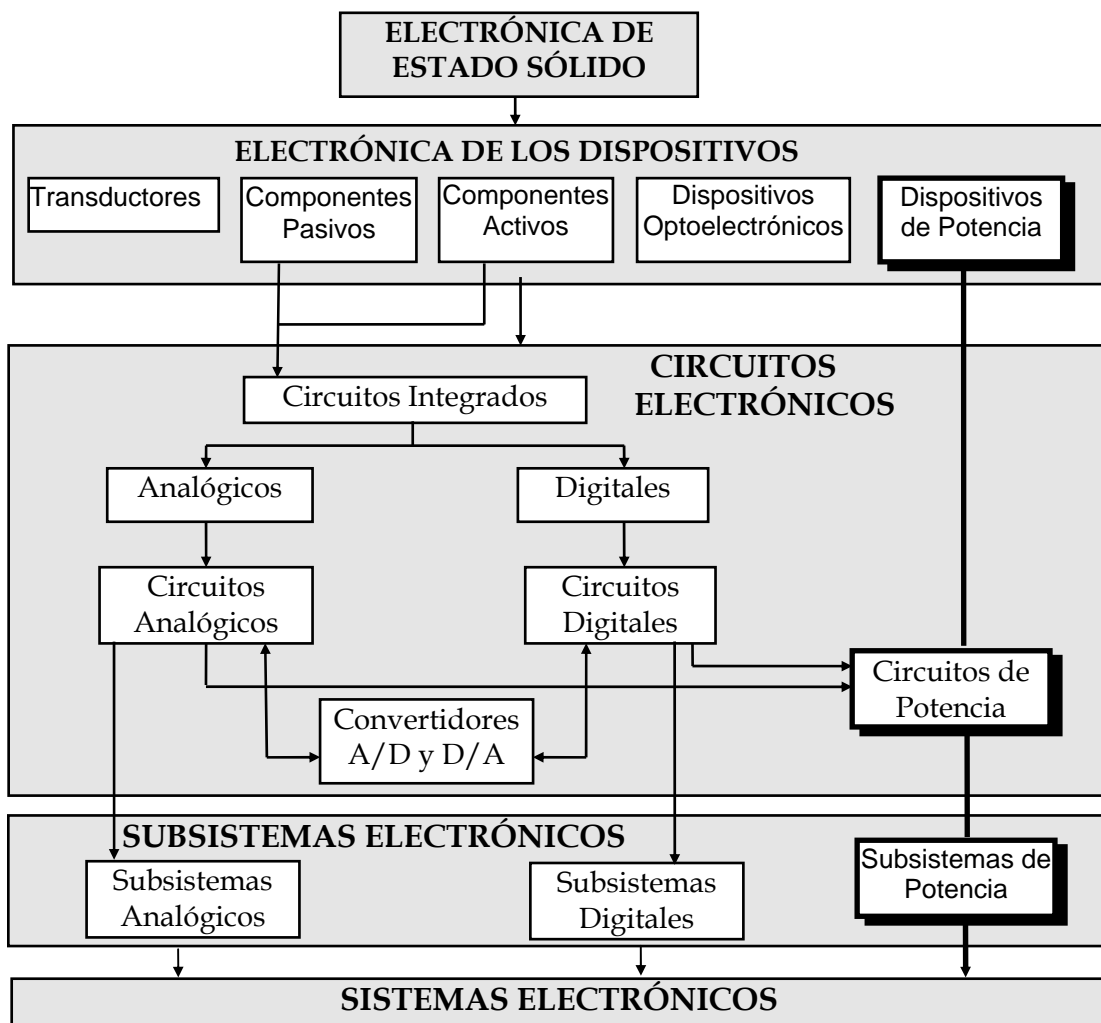


Fig. 1.9.- Niveles estructurales de la Electrónica.

1.5.- Componentes de base en la Electrónica de Potencia.

Los componentes semiconductores de potencia que vamos a caracterizar se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a su grado de **controlabilidad**:

- **Diodos** : Estado de ON y OFF controlables por el circuito de potencia.
- **Tiristores**: Fijados a ON por una señal de control pero deben conmutar a OFF mediante el circuito de potencia.
- **Conmutadores Controlables**: Conmutados a ON y a OFF mediante señales de control.(BJT, MOSFET, GTO, IGBT's)

Veamos las principales características de cada uno de estos conmutadores de estado sólido.

DIODO:

Es el elemento semiconductor formado por una sola unión PN. La figura siguiente muestra el símbolo y la característica estática i-v de dicho componente.

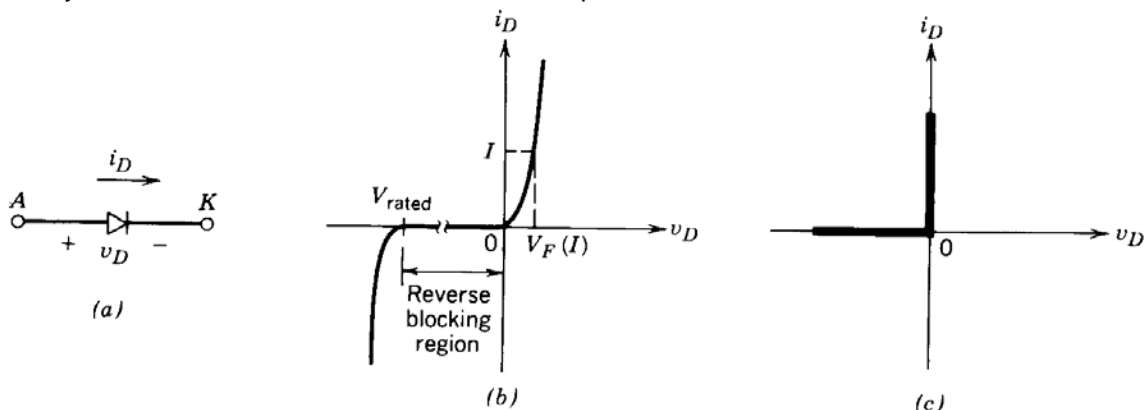


Figura 1.10.- Símbolo y característica principal de los diodos.

Son dispositivos unidireccionales, no pudiendo circular corriente en sentido contrario al de conducción. El único procedimiento de control consiste en invertir la tensión ánodo cátodo, no disponiendo de ningún terminal de control. En régimen transitorio cabe destacar dos fenómenos:

Recuperación Inversa: El paso de conducción a bloqueo no se efectúa instantáneamente. Pues cuando el diodo conduce una corriente directa I , la zona central de la unión está saturada de portadores mayoritarios, y aunque un circuito externo fuerce la anulación de la corriente aplicándole una tensión inversa, cuando la corriente pasa por cero aún existe una cantidad de portadores que cambian su sentido de movimiento y permiten la conducción de una corriente inversa durante un tiempo de recuperación inverso (t_{rr}), tal como se muestra en la figura 1.11.

Los parámetros definidos en el proceso de corte dependen de la corriente directa, del di/dt y de la tensión inversa aplicada. El tiempo de recuperación de un diodo normal es del orden de 10 μ s, siendo el de los rápidos de 0.5 a 2 μ s.

Recuperación Directa: Es otro fenómeno de retardo de menor importancia que el anterior, cuando el diodo pasa de bloqueo a conducción, y cuyo efecto se muestra en la siguiente figura.

En el proceso de paso a conducción la respuesta del diodo es inicialmente de bloqueo a la corriente. Siendo esta respuesta quien provoca una sobretensión V_{FP} , ocasionada por la modulación de la conductividad del diodo durante la inyección de portadores minoritarios. Así el diodo se asemeja a una resistencia donde su valor decrece con el tiempo. Esta resistencia equivalente está ligada a la concentración de portadores minoritarios inyectados. Por tanto V_{FP} depende de la anchura y resistividad de la zona central del diodo.

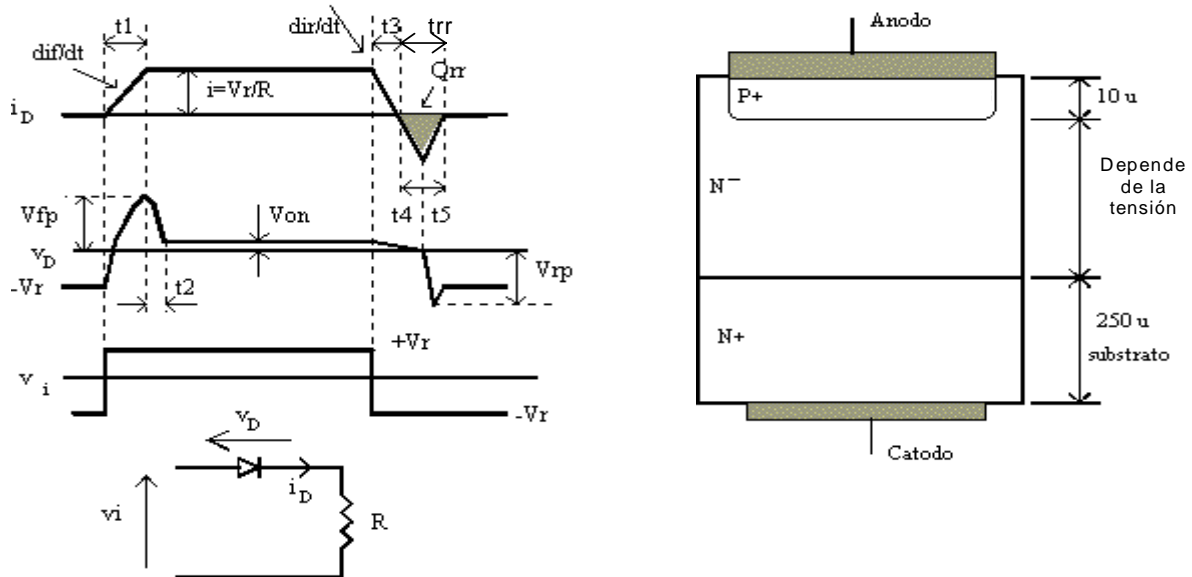


Figura 1.11.- Característica de conmutación de un diodo con carga resistiva

Dependiendo de las aplicaciones, existen varios tipos de diodos:

1. *Diodos Schottky*. Se utilizan cuando se necesita una caída de tensión directa muy pequeña (0.3 V típicos) para circuitos con tensiones de salida pequeñas. Tienen limitada su capacidad de bloquear tensión a 50 - 100 V.
2. *Diodos de Recuperación rápida*. Son adecuados en circuitos de frecuencia elevada en combinación de conmutadores controlables, donde se necesitan tiempos de recuperación pequeños. Para unos niveles de potencia de varios cientos de voltios y varios cientos de amperios, estos diodos poseen un t_{rr} de pocos microsegundos.
3. *Diodos de frecuencia de Línea*. La tensión en el estado de ON de estos diodos es la más pequeña posible, y como consecuencia tienen un t_{rr} grande, el cual es únicamente aceptable en aplicaciones de la frecuencia de línea. Estos diodos son capaces de bloquear varios kilovoltios y conducir varios kiloamperios. Pudiéndose conectar en serie y/o paralelo para satisfacer cualquier rango de tensión o de corriente.

TIRISTORES.

Dentro de la denominación general de tiristores se consideran todos aquellos componentes semiconductores con dos estados estables cuyo funcionamiento se basa en la realimentación regenerativa de una estructura PNP. Existen varios tipos, de los cuales el más empleado es el *rectificador controlado de silicio* (SRC), aplicándole el nombre genérico de tiristor.

Dispone de dos terminales principales, *ánodo* y *cátodo*, y uno auxiliar de disparo o *puerta*. En la figura siguiente se muestra el símbolo y la característica I-V estática de dicho componente. La corriente principal circula del ánodo al cátodo. En su estado de OFF, puede bloquear una tensión directa y no conducir corriente. Así, si no hay señal aplicada a la puerta, permanecerá en bloqueo independientemente del signo de la tensión V_{ak} . El tiristor debe ser disparado a ON aplicando un pulso de corriente positiva en el terminal de puerta, durante una pequeño instante, posibilitando que pase al estado de bloqueo directo. La caída de tensión directa en el estado de ON es de pocos voltios (1-3V).

Una vez empieza a conducir, es fijado al estado de ON, aunque la corriente de puerta desaparezca, no pudiendo ser cortado por pulso de puerta. Solo cuando la corriente del ánodo tiende a ser negativa, o inferior a un valor umbral, por la influencia del circuito de potencia, se cortará el tiristor

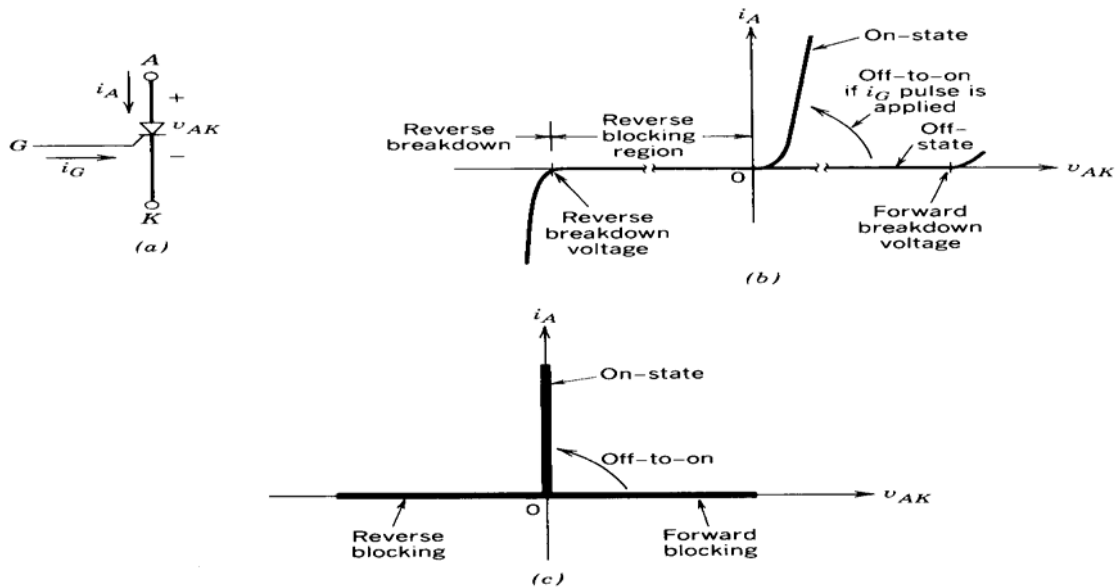


Figura 1.12.- Símbolo y característica principal de los tiristores.

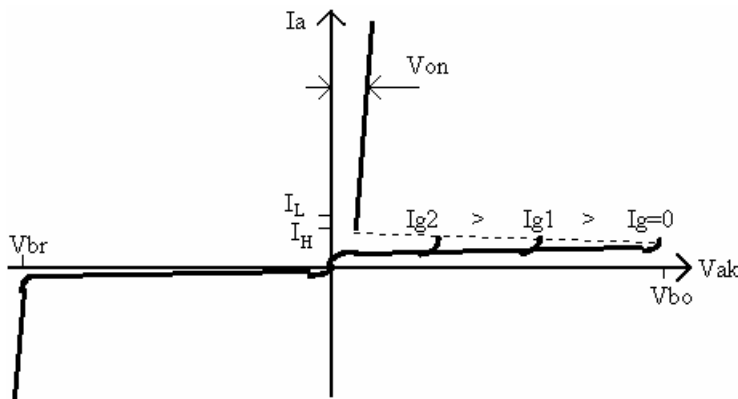


Figura 1.13.- Característica I-V de un tiristor en función de la corriente de puerta.

Si un tiristor está polarizado en directa, la inyección de una corriente de puerta al aplicar un voltaje positivo entre G y K activará al tiristor. Conforme aumenta la I_{gate} , se reduce el voltaje de bloqueo directo, tal como se muestra en esta figura.

En régimen estático, dependiendo de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo podemos distinguir tres regiones de funcionamiento:

1. $V_{ak} < 0 \rightarrow$ **zona de bloqueo inverso**. Dicha condición corresponde al estado de no conducción en inversa, comportándose como un diodo.
2. $V_{ak} > 0$ **sin disparo** \rightarrow **zona de bloqueo directo**. el tiristor se comporta como un circuito abierto hasta alcanzar la tensión de ruptura directa.
3. $V_{ak} > 0$ **con disparo** \rightarrow **zona de conducción** Se comportará como un cortocircuito, si una vez ha ocurrido el disparo, por el SCR circula una corriente superior a la corriente de enclavamiento. Una vez en conducción, se mantendrá si el valor de la corriente ánodo cátodo es superior a la corriente de mantenimiento.

En régimen transitorio cabe destacar dos fenómenos:

Transitorio a conducción: La evolución temporal de las señales se muestra en la figura siguiente, donde se observa que desde el momento en que se aplica el impulso de puerta hasta que la intensidad del ánodo empieza a subir, transcurre un tiempo denominado de retardo a la excitación ($t_d(on)$). Después la intensidad sube hasta su valor final en un tiempo t_r . La suma de los tiempos t_r y t_s se denomina tiempo de disparo t_d .

Durante el $t_d(on)$, el tiristor permanece en el estado de bloqueo. Sin embargo la corriente de puerta está inyectando portadores mayoritarios en la unión p cercana al terminal de puerta hasta que

aumenta la concentración, momento en que empieza a fluir la corriente de ánodo. Llegando a la corriente lo después del intervalo t_r .

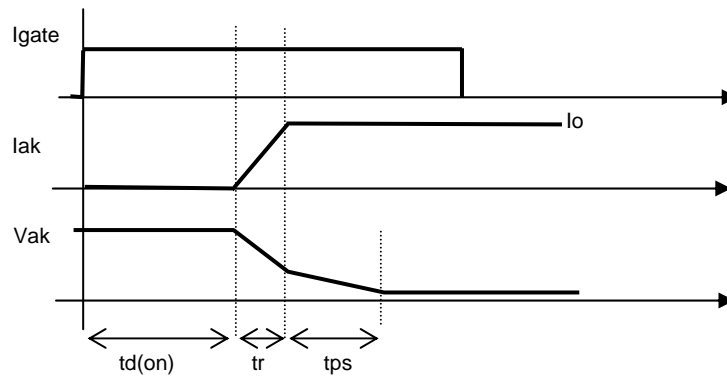


Figura 1.14.- Curvas características del proceso de puesta a conducción.

Transitorio a corte: Si el circuito externo fuerza una reducción muy brusca de la intensidad del ánodo e intenta la conducción en sentido inverso, los portadores de las uniones no pueden reajustarse, por tanto hay un tiempo de retraso por almacenamiento donde se comporta como un cortocircuito conduciendo en sentido contrario al estar polarizado positivamente, produciendo un pico de corriente I_{RRM} , tal como se muestra en la siguiente figura. Las restantes cargas se recombinan por difusión. Cuando ha disminuido la concentración, la puerta recupera su capacidad de gobierno, pudiendo aplicar tensión directa sin riesgo de cebado. A este tiempo se le denomina tiempo de recuperación de puerta t_{gr} . La duración del proceso de corte es $t_{OFF} \equiv t_g = t_{RR} + t_{GR}$. t_g suele ser del orden de 5us para los tiristores rápidos y 50us para los de red.

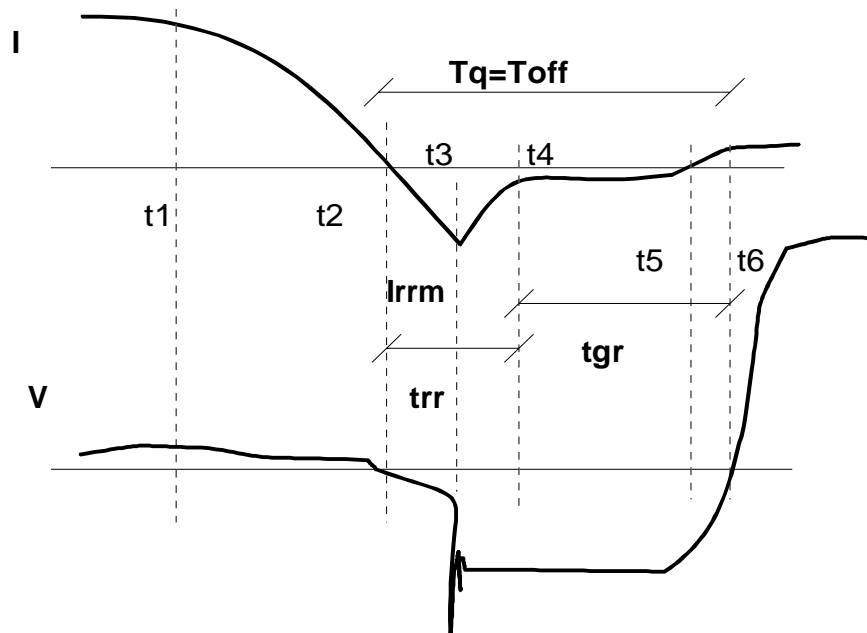


Figura 1.15.- Curvas características del proceso de corte del tiristor.

De esta forma t_q es el menor tiempo que debe transcurrir entre que se invierte la intensidad por el ánodo y el instante en que aplicamos tensión ánodo-cátodo positiva sin que entre en conducción. El tiempo t_q depende de varios factores:

- a).- Aumenta con la Temperatura.
- b).- Disminuye con la tensión inversa aplicada.
- c).- Aumenta con la intensidad directa del estado de conducción.

Dependiendo de la aplicación, existen diversos tipos. Además de parámetros de tensión y capacidad de corriente, el tiempo de turn-off (t_q), la caída directa de tensión, el di/dt en el turn-on y el dv/dt en el turn-off son características determinantes ante la elección de uno u otro tipo.

Conmutadores Controlables

En esta categoría se incluyen diversos dispositivos semiconductores de potencia, incluyendo BJTs, MOSFETs, GTOs e IGBTs, los cuales pueden ser conmutados a conducción y a corte mediante señales de control.

Un conmutador ideal controlado tiene las siguientes características:

- Bloquea cualquier tensión directa o inversa sin que circule a través suyo ninguna corriente.
- Conduce cualquier corriente con cero voltios de caída entre sus terminales.
- Conmuta de conducción a corte o viceversa instantáneamente cuando es disparado.
- No consume potencia para su control.

Sin embargo los componentes reales no disponen de todas esas características: bloquean voltajes finitas, disipan potencia, conmutan en tiempos finitos y no son capaces de bloquear voltajes inversos (dependiendo del dispositivo). Estas limitaciones llevan al conmutador real a su destrucción si no se utiliza correctamente. Para considerar la disipación de potencia en un semiconductor, consideremos el circuito de la figura siguiente:

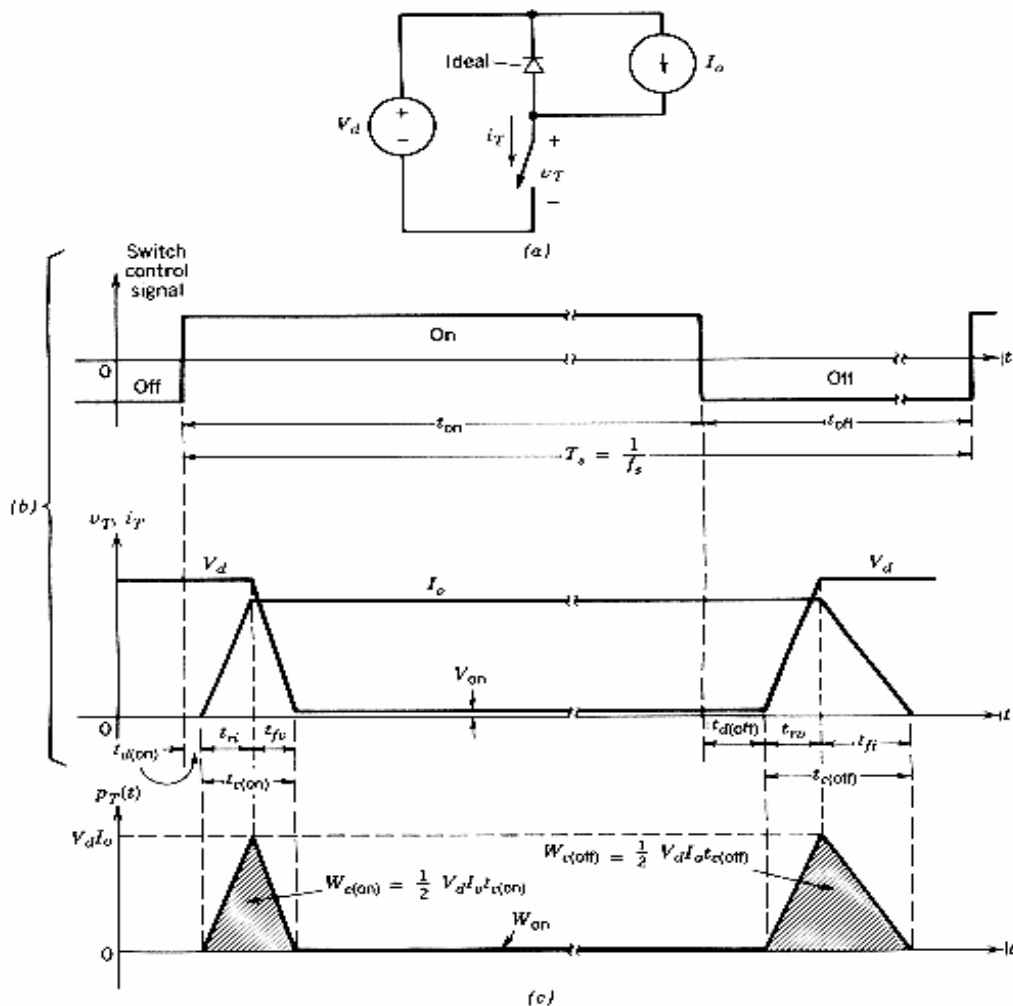


Figura 1.16.- Curvas características del proceso de conmutación en un conmutador real.

Las características deseables en un conmutador controlable se pueden resumir en los siguientes apartados:

1. Pequeña corriente de fugas en el estado de OFF.
2. Pequeña tensión en el estado de ON para minimizar las pérdidas por conducción.
3. Cortos tiempos de turn-on y turn-off. Esto posibilitará su utilización a frecuencias elevadas.
4. Gran capacidad de bloquear tensión directa e inversa.

5. Gran capacidad de conducir corrientes elevadas. Así no se necesitarán paralelizar componentes.
6. Coeficiente de temperatura positivo en la resistencia del estado de conducción. Esto asegura que al paralelizar componentes, estos compartan la corriente.
7. Pequeña potencia para el control.
8. Capacidad para resistir tensión y corriente simultáneamente durante las transiciones de los estados. Así se eliminará la utilización de redes de ayuda a la conmutación (snubber).
9. Grandes di/dt y dv/dt . Esto minimizará la necesidad de utilizar redes externas de protección.

Veamos a continuación de forma muy breve la característica V-I en estado estacionario para los conmutadores controlables más usuales:

Bipolar Junction Transistor (BJT):

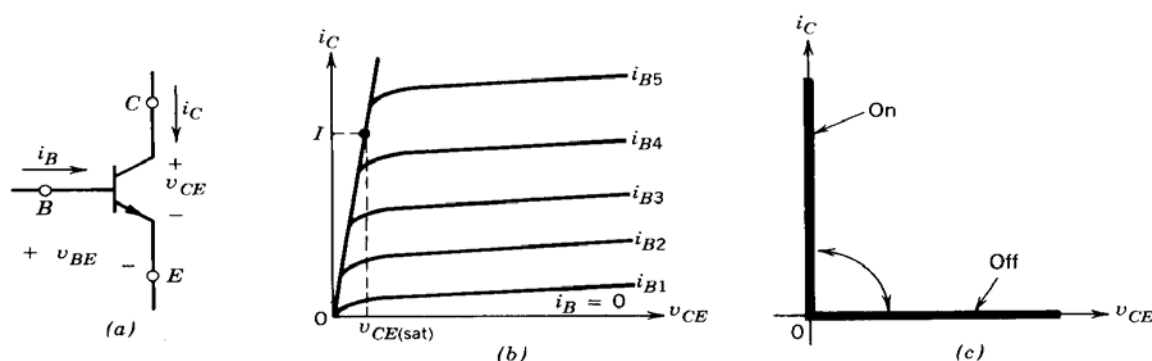


Figura 1.17.- Símbolo y característica V-I de los transistores bipolares

La figura anterior muestra el símbolo y característica estática de un transistor bipolar NPN. Tal como se muestra en su característica V-I, una corriente de base suficientemente grande $I_B > I_C / h_{fe}$ (dep. de la I_C colector) llevará al componente a la plena conducción. En el estado de conducción la tensión $V_{ce(sat)}$ está normalmente entre 1-2V.

En un transistor bipolar existen tres regiones de operación: de corte, activa y de saturación. En la región de corte el transistor está desactivado o la corriente de base no es suficiente para activarlo teniendo ambas uniones polarización inversa. En la región activa, el transistor actúa como un amplificador, donde la corriente del colector queda amplificada mediante la ganancia y el voltaje V_{ce} disminuye con la corriente de base: la unión CB tiene polarización inversa y la BE directa. En la región de saturación el transistor actúa como interruptor teniendo una corriente de base lo suficientemente grande para disminuir la V_{ce} : ambas uniones están polarizadas directamente. La característica de transferencia se muestra en la siguiente figura:

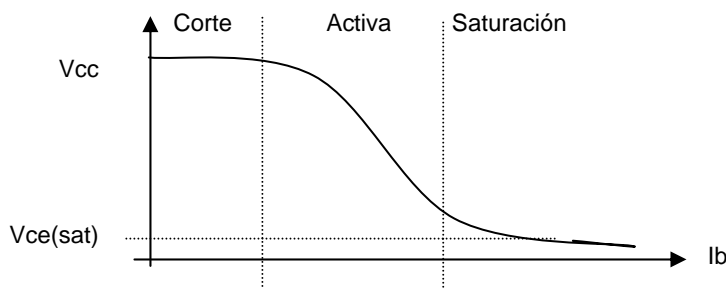


Figura 1.18.- Características de transferencia en un transistor bipolar.

Manejan menores voltajes y corrientes que el SCR, pero son más rápidos. Fáciles de controlar por el terminal de base, aunque el circuito de control consume más energía que el de los SCR. Su principal ventaja es la baja caída de tensión en saturación. Como inconvenientes destacaremos su poca ganancia con v_i grandes, el tiempo de almacenamiento y el fenómeno de avalancha secundaria.

Gate-Turn-Off Thyristors (GTOs):

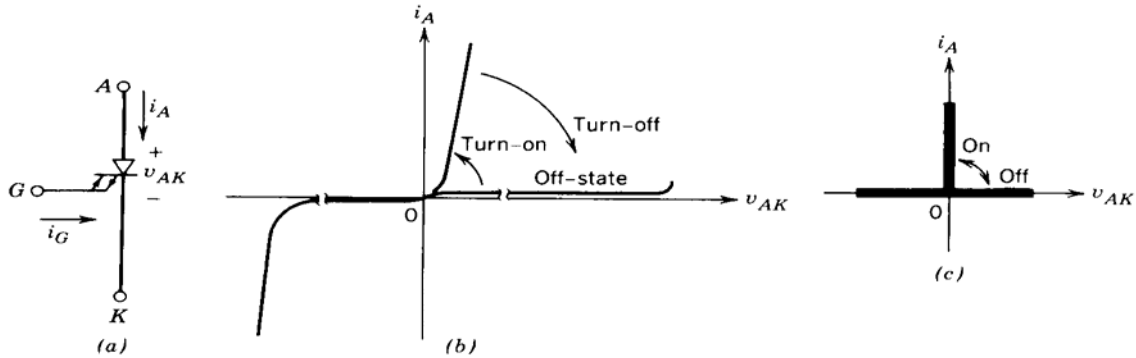


Figura 1.19.- Símbolo y característica V-I de los tiristores controlados a corte.

Funcionamiento muy similar al SCR pero incorporando la capacidad de bloquearse de forma controlada mediante una señal de corriente negativa por puerta. Mayor rapidez frente a los SCR, soportando tensiones y corrientes cercanas a las soportadas por los SCRs. Su principal inconveniente es su baja ganancia de corriente durante el apagado, lo cual obliga a manejar corrientes elevadas en la puerta, complicando el circuito de disparo.

Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET):

El control del MOSFET se realiza por tensión, teniendo que soportar solamente un pico de corriente para cargar y descargar la capacidad de puerta. Como ventajas destacan su alta impedancia de entrada, velocidad de conmutación, ausencia de ruptura secundaria, buena estabilidad térmica y facilidad de paralelizarlos. En la siguiente figura se muestra el símbolo, característica estática V-I y característica ideal de un MOSFET de canal N.

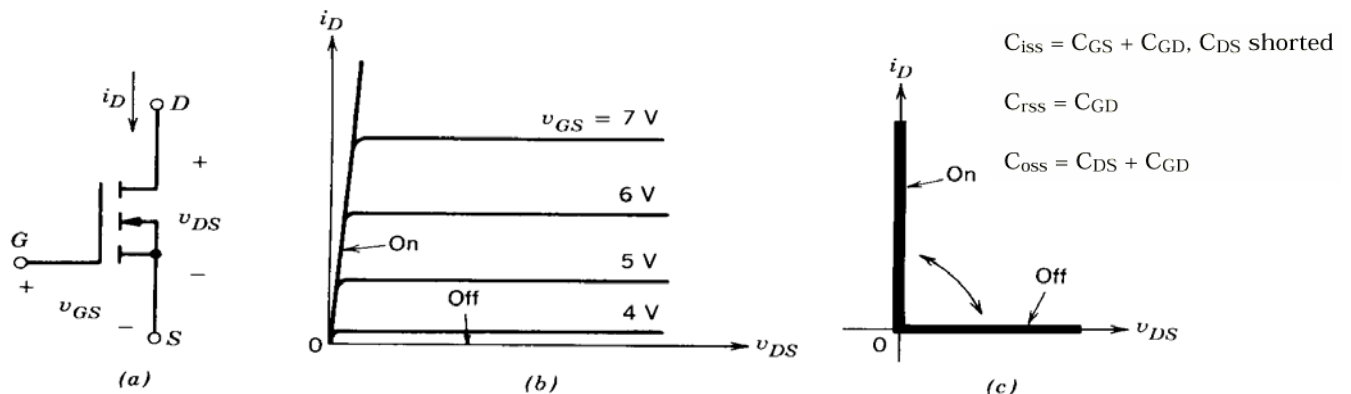


Figura 1.20.- Símbolo y característica V-I de los transistores MOSFET

Veamos a continuación el circuito equivalente, donde se indican los componentes que tienen un mayor papel en el proceso de conmutación.

La capacidad Gate-to-drain, C_{GD} , se comporta como una función no lineal con la tensión, siendo uno de los parámetros más importantes al representar un lazo de realimentación entre la salida y la entrada del circuito. C_{GD} se suele llamar Capacidad de Miller debido a que causa que la capacidad de entrada dinámica sea mayor que la suma de las capacidades estáticas. Turn-on delay, $t_{d(on)}$, es el tiempo que se tarda en cargar a la capacidad de entrada del componente antes de que la corriente por el drenador comience. Similarmente, turn-off delay, $t_{d(off)}$, es el tiempo que necesita para descargar dicha capacidad

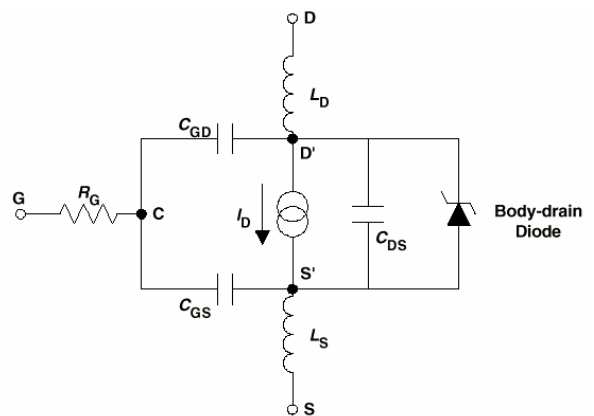


Figura 1.21.- Circuito equivalente de un MOSFET

Comparación entre Bipolares y Mosfets:

BJT	MOSFET
<ul style="list-style-type: none"> ▪ CORRIENTE BIPOLAR. Portadores minoritarios determinan la resistencia de conducción. .Efectos de almacenamiento. Coeficiente de temperatura negativo 2ª ruptura Pequeña resistencia de conducción 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CORRIENTE UNIPOLAR No hay efectos de almacenamiento. Coeficiente de temperatura positivo No hay 2ª ruptura. $R_{DS(ON)}$ grande especialmente en MOS de alta tensión.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ CONMUTADOR GUIADO POR CORRIENTE. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CONMUTADOR GUIADO POR TENSION.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ APROVECHAMIENTO OPTIMO DEL Si. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ MAL APROVECHAMIENTO DEL Si.

Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs):

En la siguiente figura se muestra el símbolo y la característica V-I de funcionamiento de un IGBT:

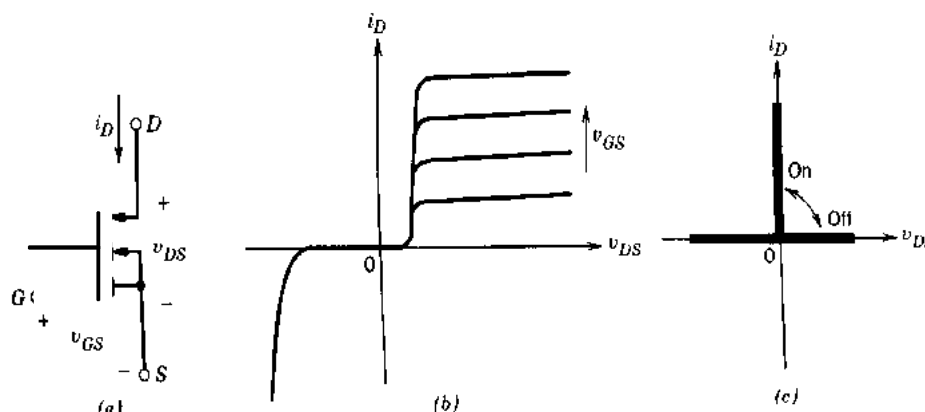
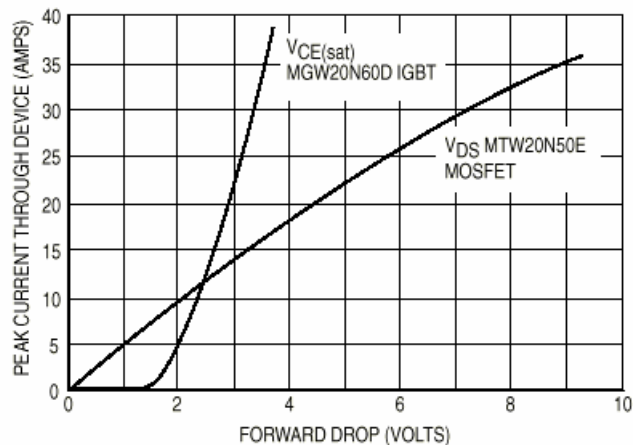


Figura 1.22.- Símbolo y característica V-I de los transistores IGBT

El IGBT combina las ventajas de los MOSFETs y de los BJTs, aprovechando la facilidad del disparo del MOSFET al controlarlo por tensión y el tipo de conducción del bipolar, con capacidad de conducir elevadas corrientes con poca caída de tensión. El IGBT tiene una alta impedancia de entrada, como el Mosfet, y bajas pérdidas de conducción en estado activo como el Bipolar. Pero no presenta ningún problema de ruptura secundaria como los BJT.

El IGBT es inherentemente más rápido que el BJT. Sin embargo, la velocidad de conmutación del IGBT es inferior a la de los MOSFETs. Veamos a continuación una gráfica, donde se compara la caída directa de tensión respecto a la corriente entre un Mosfet y un IGBT de similares características:

Figura 1.23.- Comparación de la caída de tensión directa en un MOSFET y un IGBT.



TEMA 1 : Introducción a los Sistemas de Potencia

Characteristic	TMOS	IGBT	Bipolar
Current Rating	20 A	20 A	20 A
Voltage Rating	500 V	600 V	500 V*
$R_{(on)} @ T_J = 25^\circ\text{C}$	0.2 Ω	0.24 Ω	0.18 Ω
$R_{(on)} @ T_J = 150^\circ\text{C}$	0.6 Ω	0.23 Ω	0.24 Ω^{**}
Fall Time (Typical)	40 ns	200 ns	200 ns

* Indicates V_{CEO} Rating

** BJT $T_J = 100^\circ\text{C}$

Ventajas del IGBT comparado con el MOSFET y con el Transistor Bipolar respecto de la Resistencia de ON (Over Junction Temperature) y del Fall Times (Resistance Values at 10 Amps of Current)

Destacamos que los componentes de la tabla anterior son de niveles de V/I comparables, sin embargo el transistor Bipolar necesita 1.2 veces más área de Silicio que el IGBT, y el MOSFET necesita 2.2 veces más área de Si que el IGBT para conseguir los mismos niveles de V/I, lo cual incide en el coste del semiconductor. Para corrientes elevadas y temperaturas altas, el IGBT ofrece una baja caída de tensión directa con unos tiempos de conmutación similares al Bipolar sin complicaciones en el circuito de disparo.

Mos-Controlled Thyristors (MCT):

Su símbolo y característica estática se muestra a continuación.

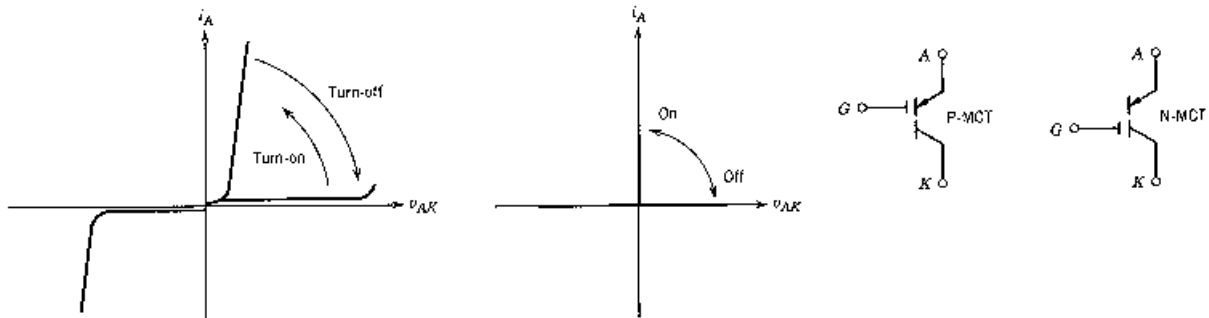


Figura 1.24.- Símbolo y característica V-I de los transistores MCT.

De la característica se observa que el MCT tiene muchas de las propiedades del GTO, incluyendo su baja caída de tensión en su estado de ON para corrientes relativamente grandes, junto a su característica de latch (el MCT permanece a ON incluso si la señal de puerta desaparece). El MCT es un dispositivo controlado por tensión, y dispone de dos ventajas principales respecto al GTO: Circuito de disparo más simple al no necesitar corrientes negativas grandes para el turn-off y mayor velocidad en las conmutaciones. Además dispone de una caída de tensión en ON menor que el IGBT.

Finalmente veamos un gráfico que compara las capacidades de tensión, corriente y frecuencia de dichos componentes controlables.

