


Dispositivos Semiconductores para Electrónica de   
Potencia

2 

# Capítulo 1

## Introducción

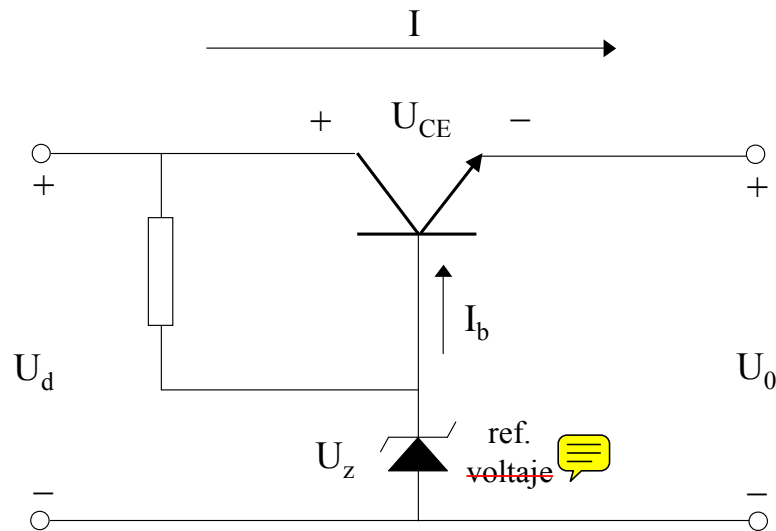
La Electrónica de Potencia es la disciplina tecnológica que trata la conversión eficiente de energía eléctrica de la forma en que se encuentra disponible en sus fuentes a la forma en que la necesitan sus consumidores. En el equipamiento asociado al desarrollo tecnológico actual esas formas generalmente no coinciden.

Originada en el invento del tiristor a fines de la década del 50, la Electrónica de Potencia con dispositivos de estado sólido para conmutación se desarrolla como tecnología de aplicación masiva en los últimos 30 años. La energía eléctrica está disponible en formas tales como la red pública de determinada tensión, frecuencia y número de fases, en generadores, sistemas de generación alternativa, baterías y elementos de acumulación de energía eléctrica, paneles solares, termocuplas de potencia. Los consumidores requieren tensión alterna de cantidad de fases determinada y tensión y frecuencia reguladas, fijas o variables, o tensión o corriente continua de valores regulados, fijos o variables. Ejemplos de la necesaria conversión se encuentran en las fuentes que convierten tensión alterna de la red pública en las tensiones continuas que requieren los circuitos de sistemas electrónicos, en el control de velocidad de motores eléctricos (bombeo, ascensores, maquinaria industrial), en sistemas de transmisión de energía eléctrica (regulación de tensión, intercambio de energía entre redes de distinta frecuencia, como el caso Uruguay - Brasil), en sistemas de energía alternativa (adaptación de energía de origen solar o eólico), en los sistemas de energía ininterrumpible para sistemas telefónicos, computadoras y equipos críticos. Las potencias manejadas por los sistemas convertidores van desde alguna fracción de Watt hasta miles de MW.

La tecnología asociada se basa en el uso de dispositivos semiconductores que funcionan como interruptores capaces de conducir altas corrientes cuando están cerrados, soportar altas tensiones cuando no conducen y pasar del estado de conducción al corte en tiempos que van de decenas de nanosegundos a algunos microsegundos. La comprensión adecuada de sus características, funcionamiento y aplicabilidad es fundamental para el ingeniero que desarrolle su actividad en relación con estos equipos o con sus áreas de aplicación.

## 1.1. Tipos básicos de convertidores

El objeto de estudio y de aplicación de la Electrónica de Potencia es la conversión de potencia eléctrica con un mínimo de pérdidas, utilizando interruptores o llaves y componentes que acumulan energía en forma transitoria. El modelo básico de cada convertidor considera llaves y componentes ideales, y por lo tanto conversión sin pérdidas; la potencia media de entrada es la misma que la de salida. Las pérdidas constituyen por tanto un apartamiento del modelo. Cabe hacer notar que existen convertidores en los que las pérdidas son parte del modelo. Los dispositivos semiconductores no son usados como llaves sino que funcionan dentro de su zona activa. El caso más común es el del Regulador Lineal, que es un convertidor de Corriente Continua (C.C.) a Corriente Continua (C.C.) donde en su concepción más básica se utiliza un transistor operando en su zona lineal (figura 1.1). En esta zona de operación es posible controlar la caída de tensión entre el colector y el emisor del mismo. De esa forma se puede controlar la tensión de salida  $U_0$  ante variaciones de la tensión de entrada  $U_d$  y de la corriente de carga  $I$ . En este caso las pérdidas que se introducen por la caída de tensión en el elemento activo forman parte del modelo del convertidor.



$$U_0(t) = U_d(t) - U_{CE}(t)$$

$$U_0 \approx \text{cte.}$$

$$P_{\text{disipada}} = U_{CE} \times I$$

$$P_{\text{salida}} = U_0 \times I$$

Figura 1.1: Conversión CC  $\leftrightarrow$  CC con pérdidas en el modelo (Regulador Lineal)

Los ejemplos de convertidores que siguen ilustran el mecanismo de la conversión de potencia eléctrica sin pérdidas.

### 1.1.1. Conversión entre tensión (corriente) alterna (C.A.) y continua (C.C.) mediante un convertidor conmutado por la red

El convertidor de la figura 1.2 utiliza seis llaves llamadas tiristores y una inductancia. Transfiere energía entre un sistema trifásico de tensiones de fase  $U_R$ ,  $U_S$  y  $U_T$  y un sistema de corriente continua de tensión  $U_0$  que puede ser una *fem* (batería, motor de corriente continua) o un condensador suficientemente grande como para poder considerar  $U_0$  constante sobre la carga útil. En el caso de un motor de corriente continua la inductancia puede ser la de armadura del propio motor.

El tiristor es una llave de electrodos Ánodo y Cátodo. Un tercer electrodo (Gate) permite el pasaje de la llave a estado de conducción. Si se le aplica una tensión ánodo - cátodo menor que cero ( $U_A - U_K < 0$ ) el tiristor no conduce (llave abierta). Si la tensión ánodo - cátodo es positiva ( $U_A - U_K > 0$ ) el tiristor no conduce a menos que se haga circular una corriente entre el gate y el cátodo. En ese caso la llave se cierra (disparo del tiristor). El tiristor se apaga si la corriente ánodo - cátodo se anula.

El sistema trifásico hace que, en cada período, todos los tiristores queden con tensión ánodo - cátodo positiva en algún intervalo ( $U_A - U_K > 0$ ). Accionando el gate en instantes adecuadamente elegidos, el tiristor dispara (se cierra la llave) cumpliendo dos funciones: conectar su fase a los puntos A o B y apagar, mediante una corriente inversa, el tiristor que conducía previamente.

De ese modo se construye una tensión  $u_d(t)$  entre los puntos A y B mediante intervalos de las tensiones  $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ,  $U_{SR}$ ,  $U_{TS}$  y  $U_{RT}$  seleccionadas de manera que  $\langle u_d(t) \rangle = U_d$ , regulable mediante los comandos a los electrodos de gate (G).

La inductancia  $L$  permite unir  $u_d(t)$  con  $U_0$ . En estado estacionario ( $\langle i_L(t) \rangle = I_L = cte.$ ) se cumple que  $\langle u_d(t) \rangle = U_d = cte$ . La inductancia funciona como filtro, almacenando y suministrando la diferencia de potencia instantánea:

$$\Delta P(t) = u_d(t)I_L(t) - U_0I_L \quad (1.1)$$

La polarización positiva de cada tiristor y por lo tanto su capacidad de pasar a funcionar como llave cerrada depende de la polaridad de las tensiones de red, de ahí el nombre genérico de "Convertidores conmutados por la red".

En la figura 1.2, la corriente  $I_L$  circula por los tiristores 1 y 2. Si  $U_S > U_R$ , el tiristor 3 está en condiciones de conducir. Si se cierra (dispara, o "se prende") el tiristor 3, la corriente es conmutada del tiristor 1 al tiristor 3. El tiristor 1 se apaga y queda con polarización  $U_{AK} = U_R - U_S < 0$ . El apagado es entonces determinado por la red. La corriente retorna por el tiristor 2 a la fase  $U_T$ .

La carga sobre la que se aplica la tensión  $U_0$  puede ser una *fem* de polaridad única (batería), una *fem* de polaridad variable con una inductancia (motor - generador de corriente continua) o un condensador con un consumidor resistivo.

Si la carga tiene una *fem* negativa actúa como generador y el convertidor puede suministrar energía activa desde la carga a la red. Como el control de la tensión se basa en el retardo entre el momento en que el tiristor es capaz de

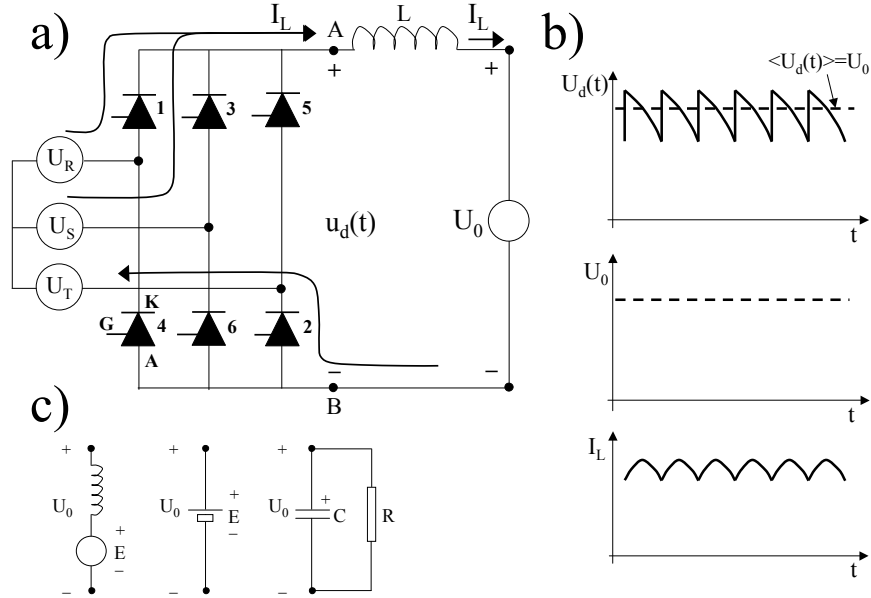


Figura 1.2: Conversión CA  $\leftrightarrow$  CC con conmutación determinada por la red - a) Esquema - b) Formas de onda - c) Cargas

conducir y el momento en el que se lo hace conducir efectivamente, la corriente de fase de corriente alterna se retrasa con respecto a la tensión. El convertidor por lo tanto siempre consume potencia reactiva. Si el retardo es cero se tiene un caso particular que es el puente de diodos.

### 1.1.2. Conversión entre C.C. y C.A. mediante un convertidor con conmutación forzada

El tiristor es una llave que se cierra (se "prende") mediante un comando externo pero se apaga cuando la corriente que circula por el mismo se hace cero, por ejemplo haciendo circular una corriente inversa mediante el encendido de otro tiristor, en un instante que además depende de la condición de la red. El circuito de la figura 1.2 permite entregar potencia a la red pero no modificar su forma de onda (amplitud, frecuencia) que ya está determinada. Puede sí modificar tensión o corriente del lado de C.C.

Si se quiere suministrar energía de una fuente de C.C. a un sistema de C.A. y además determinar la amplitud y frecuencia del mismo se utiliza un convertidor basado en llaves cuyo electrodo de comando permite tanto su prendido como su apagado. Normalmente se usan llaves que conducen en los dos sentidos, con la conducción comandable en un sentido y libre en el otro.

Llamamos  $Q$  a la llave completa,  $T$  a la llave de conducción directa comandable y  $D$  al diodo de conducción inversa.

El convertidor de la figura 1.3 realiza la conversión entre una fuente de C.C.

y un sistema de C.A. monofásico.

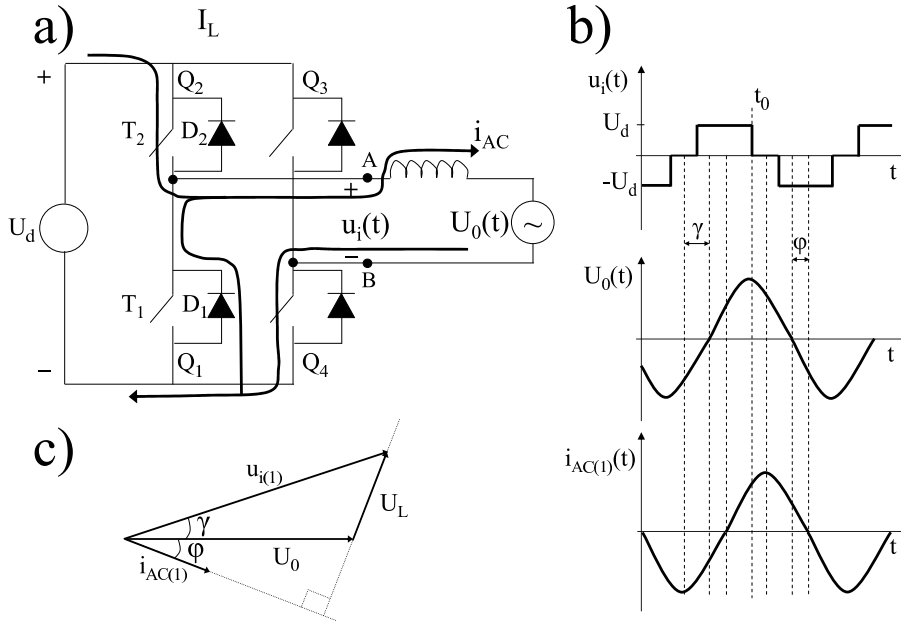


Figura 1.3: Conversión CC - CA mediante conmutación forzada - a) Esquema - b) Formas de onda - c) Diagrama de fasores

Mediante el comando de las llaves  $Q_1, Q_2, Q_3$  y  $Q_4$  se conecta la tensión  $U_d$  a los puntos A y B, obteniéndose una tensión alterna  $u_i(t)$ .  $Q_2$  y  $Q_4$  cerradas producen un pulso positivo,  $Q_1$  y  $Q_3$  un pulso negativo y la zona de tensión cero se produce mediante la conducción simultánea de  $Q_1$  y  $Q_4$  o  $Q_2$  y  $Q_3$ . La amplitud de la fundamental de  $u_i(t)$  se ajusta mediante el tiempo de conducción de  $Q_2Q_4$  y  $Q_1Q_3$ .

La inductancia permite conectar la tensión  $u_i(t)$ , consistente en una onda rectangular modificada, a una tensión sinusoidal.

La figura 1.3c) muestra el diagrama de fasores correspondiente. El valor y la fase de la corriente - consistente en una senoide y armónicos - depende de la carga y de la fase entre  $u_i$  y  $U_0$ . Cada par de llaves conectado en serie y entre los bornes de  $U_d$  forma una rama, por ejemplo  $Q_1$  y  $Q_2$ .

La conmutación se puede ilustrar de la siguiente forma: antes del instante  $t_0$  (figura 1.3b)) conducen  $Q_2$  y  $Q_4$ , la tensión  $u_i(t) = U_d$  y la corriente, de acuerdo al ejemplo, circula por las llaves comandables correspondientes  $T_1$  y  $T_4$ . En  $t_0$  se apaga  $Q_2$  y se prende  $Q_1$ . La corriente se mantiene, por lo tanto la inductancia genera una tensión con polaridad tal que la tensión en el punto A baja hasta que conduce el diodo  $D_1$ . La corriente conmuta por lo tanto de  $T_2$ , llave comandable de  $Q_2$ , a  $D_1$ , diodo de conducción inversa de  $Q_1$ . Luego de  $t_0$ , conducen  $D_1$  y  $T_4$  y la tensión instantánea de salida es cero.

La tensión  $U_0(t)$  puede ser la fem interna de un motor o generador (la inductancia podría estar inductiva) o la tensión sobre un condensador  $C$  que tiene conectada en paralelo la carga a alimentar.

El convertidor permite controlar la amplitud, la fase y la frecuencia de la

tensión alterna. En particular, el diagrama fasorial de la figura 1.3 muestra que, si  $U_0$  es una fuente de corriente alterna, ajustando la amplitud y la fase es posible extraer y suministrar potencia al lado de corriente continua y extraer y suministrar potencia activa y reactiva al lado de corriente alterna.

### 1.1.3. Conversión C.C. - C.C. (continua-continua)

La figura 1.4 muestra un convertidor básico CC - CC. En particular se trata de un convertidor llamado Buck, step down o chopper reductor, y convierte una tensión  $U_d$ , generalmente no regulada, en una tensión  $U_0$  de menor valor y regulada.

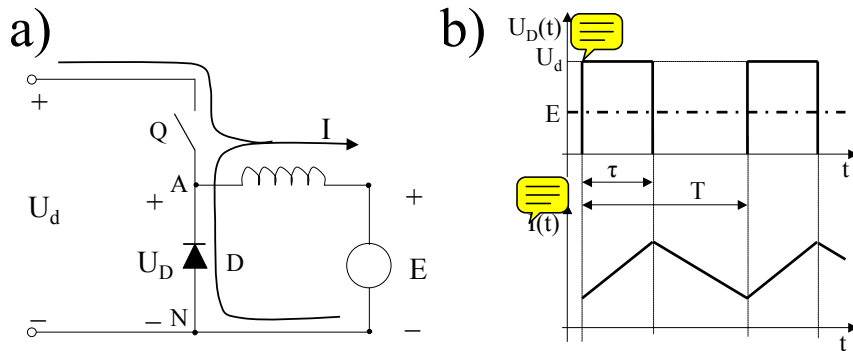


Figura 1.4: Conversión CC - CC - a) Esquema - b) Formas de onda

La llave comandable  $Q$  se cierra y abre con un ciclo de trabajo  $\delta = \tau/T$  (ver figura 1.4b)). La tensión  $U_D = U_{AN}$  vale alternativamente 0 y  $U_d$  con ancho de pulso ajustable mediante el tiempo de conducción de  $Q$ . La tensión de salida en estado estacionario es  $E = \langle U_D \rangle = \delta U_d$ . La tensión  $E$  puede representar la fem de un motor, una batería o un condensador  $C$  seguido de su carga. El sentido del flujo de potencia es único (convertidor no reversible).

La figura 1.5 muestra un convertidor CC - CC reversible. Si se abre y cierra  $Q_2$  y se deja abierta  $Q_1$  se tiene el caso de la figura 1.4. Si se abre y cierra  $Q_1$  y se deja abierta  $Q_2$ , cada vez que se corta  $Q_1$  la corriente que circulaba por  $Q_1$  a  $N$  circula ahora por  $D_2$  hacia  $U_d$ . Se obtiene un chopper elevador con inversión del sentido de la corriente.

## 1.2. Llaves ideales

Los ejemplos de convertidores ~~presentados~~ <sup>presentados</sup> tienen dos características básicas: su rendimiento es uno y ~~soportan~~ <sup>soportan</sup> cualquier tensión y corriente. Eso implica considerar que todos los conductores, inductancias, condensadores y transformadores tienen resistencia óhmica cero y aislación infinita, y que las llaves son interruptores ideales. Los convertidores usados en la práctica son aproximaciones a los ideales. El grado de aproximación depende del uso y requerimientos sobre el convertidor, de la optimización económica y de las limitaciones tecnológicas.



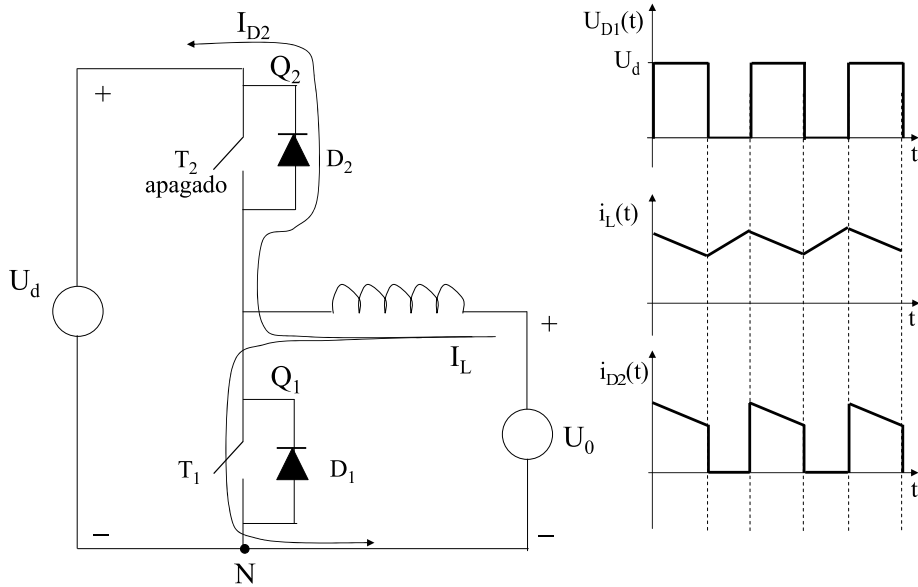


Figura 1.5: Convertidor CC - CC reversible funcionando como chopper elevador (Boost)

Las condiciones de trabajo de las llaves ideales, pueden ser caracterizadas para tener parámetros y criterios que permitan elegir la implementación real más adecuada.

### 1.2.1. Características de las llaves ideales

Para un primer análisis de circuitos convertidores de potencia, los dispositivos que se utilizan como llaves se modelan como componentes ideales. Si se resumen las características del comportamiento de una llave ideal se tiene:

#### Características estáticas

##### Llave Abierta

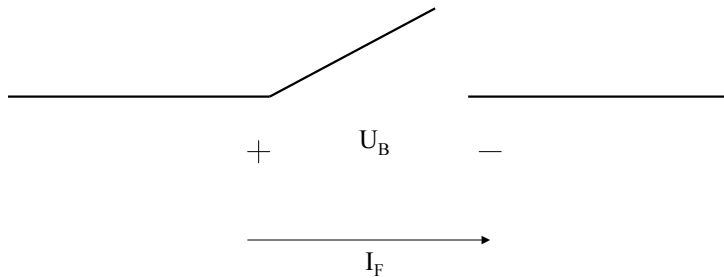


Figura 1.6: Llave abierta

Funcionamiento: La llave mantiene sobre sí una tensión  $U_B$  de cualquier polaridad y tan grande como se quiera mientras que la corriente de fugas  $I_F$  a

través de la misma es nula. Este estado se denomina bloqueo.

### *Llave Cerrada*

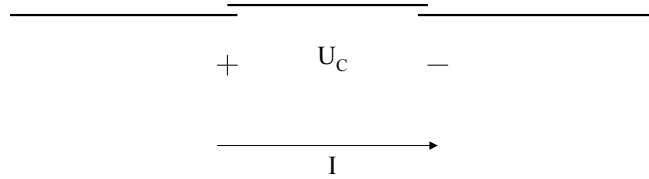


Figura 1.7: Llave cerrada

Funcionamiento: La llave permite que circule a través de ella una corriente  $I$  de cualquier valor y tiene una caída de tensión en conducción  $U_C = 0$ .

### **Características dinámicas:**

#### *Apertura o corte (turn-on)*

El tiempo de corte de la corriente  $I$  y de restablecimiento de la tensión en bornes de la llave, ( $t_{off}$ ) es nulo.

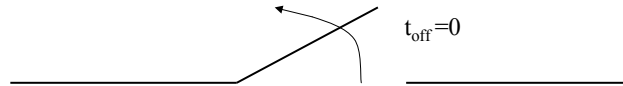


Figura 1.8: Llave abriendo

### *Cierre*

Análogamente que en la apertura, el tiempo de cierre de la llave  $t_{on}$  es nulo

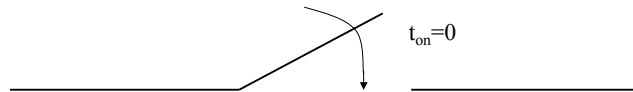


Figura 1.9: Llave cerrando

La llave puede tener un comando externo que determina el instante de apertura o cierre. En la llave ideal el comando es una señal lógica que no consume energía.

Como casos particulares de llaves ideales utilizadas en circuitos de convertidores podemos considerar el diodo ideal, el tiristor ideal y la llave apagable con conducción inversa.

## 1.2.2. Diodo ideal:

Se definen signos para tensiones y corriente de acuerdo a la figura 1.10.

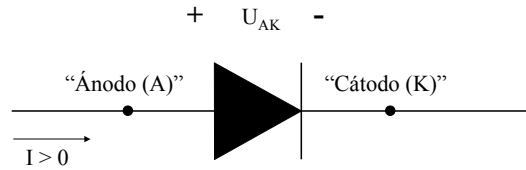


Figura 1.10: Diodo

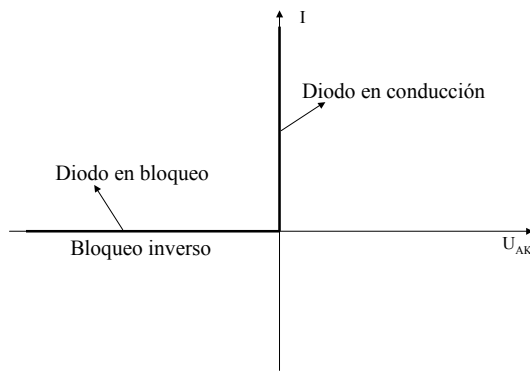


Figura 1.11: Característica del diodo ideal

El diodo ideal tiene dos estados: bloqueo inverso y conducción.

Llamamos  $U_R$  al valor absoluto de la tensión inversa que soporta el diodo. Un diodo ideal bloquea cualquier tensión inversa  $U_{AK} = -U_R < 0$  impuesta en sus bornes por el circuito externo sin que circule corriente alguna a través del mismo.

El diodo ideal conduce con  $U_{AK} = 0$  cuando el circuito externo impone una corriente en el sentido ánodo  $\rightarrow$  cátodo en la rama del circuito donde el diodo está conectado en serie.

### 1.2.3. Tiristor ideal:

Las corrientes y tensiones se definen según la figura 1.12. La señal  $I_G$  (en este caso una corriente) constituye el comando externo de la llave.

EL tiristor ideal tiene tres estados: bloqueo inverso, bloqueo directo y conducción, que se ilustran en la figura 1.13.

- En **bloqueo inverso**:

$$U_{AK} = -U_R < 0 \quad (1.2)$$

y el tiristor, al igual que el diodo, no conduce, independientemente del estado del electrodo de comando (*gate*).

- Si se cumple que:

$$U_{AK} = U_D > 0 \quad (1.3)$$

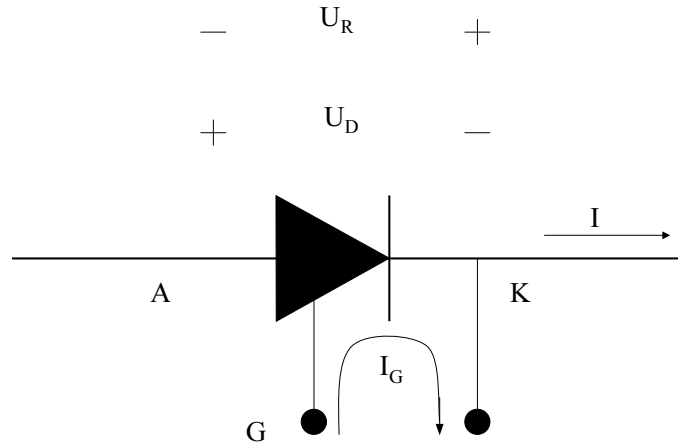




Figura 1.12: Tiristor


siendo  $U_D$  un valor positivo que llamaremos tensión directa, y además la corriente de comando, que circula de gate a cátodo, es cero, entonces el tiristor no conduce. Este estado se llama **bloqueo directo**.

- **Conducción:** si el tiristor está en bloqueo directo (ecuación 1.3) y además se hace circular corriente entre el gate y el cátodo durante cualquier tiempo  $t > 0$ , entonces el dispositivo entra en estado de conducción en un tiempo  $t_{on} = 0$ . El tiristor pasa de tener corriente nula a conducir la corriente impuesta por el circuito externo. Decimos que el tiristor "se prende".

En conducción,  $U_{AK} = 0$ . El tiristor deja de conducir (se apaga) cuando la corriente que circula por él se anula. El apagado se produce en un tiempo  $t_{off} = 0$  y en esa situación la tensión en bornes del dispositivo vuelve a estar impuesta por el circuito externo. Esa tensión es normalmente  $U_{AK} < 0$  por lo que el tiristor pasa a estado de bloqueo inverso.

#### 1.2.4. Llave completamente controlable (apagable):

Una llave apagable ideal es un dispositivo en el cual la corriente puede cortarse (apertura de la llave) mediante un comando externo, normalmente una señal (tensión o corriente) en el mismo electrodo que permite el encendido. En principio la llave puede bloquear tensión en forma cta o inversa, aunque la acción del electrodo de comando esté restringida a bloqueo directo como en el tiristor. En rigor el dispositivo es una "llave o interruptor completamente controlable mediante electrodo de comando". En el texto utilizamos en general la denominación "llave apagable", ya que es lo que la distingue del tiristor.

Este tipo de llaves puede tener bloqueo inverso o conducción inversa. La llave apagable con bloqueo inverso se usa en algunas aplicaciones especiales  usualmente de potencias altas (Zargar, Rizzo, Xiao, Iwamoto & Donlon 2001).

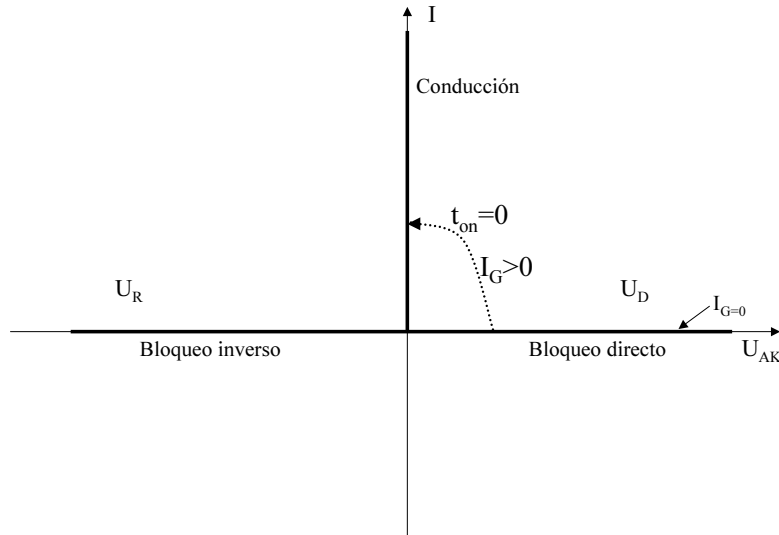


Figura 1.13: Característica del tiristor ideal

**Llave apagable con conducción inversa:**

En muchas de las aplicaciones que implican apagado de la llave con corriente  $I \neq 0$  se requiere que la llave conduzca con polarización inversa.

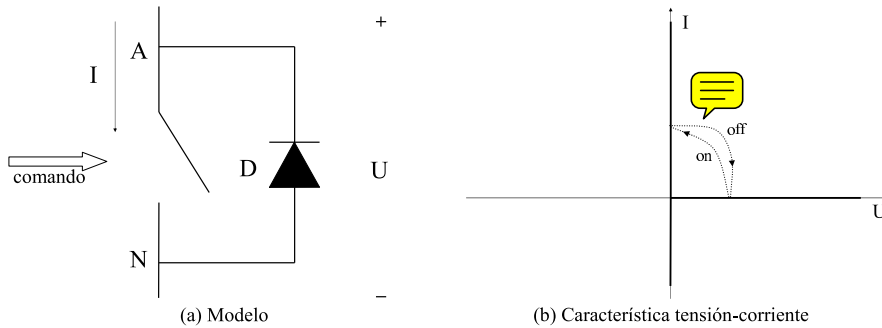


Figura 1.14: Llave completamente comandable (apagable) con ~~conducción~~ inversa

Una llave apagable con conducción inversa conduce la corriente que impone el circuito externo si tiene polarización inversa ( $U < 0$ ), sin importar si tiene señal de comando. La conducción inversa se da a través del diodo en antiparalelo que tiene el dispositivo. Para que la llave conduzca con polarización directa necesita recibir una señal de comando. Una vez que recibe esta señal, instantáneamente el dispositivo pasa a conducir la corriente que impone el circuito externo. En esa condición, la llave conducirá la corriente impuesta hasta que reciba la señal de apagado, donde pasará de conducir la corriente impuesta por el circuito externo a bloquear una tensión positiva.

La figura 1.14 muestra el circuito equivalente de la llave apagable con conducción inversa y representa la característica tensión - corriente de una llave apagable con conducción inversa. Las trayectorias “on” y “off” representan prendido y apagado respectivamente.

### 1.3. Llaves reales

La implementación física real de una llave implica tanto apartamientos de sus características ideales como limitaciones a sus capacidades de conducir corriente y bloquear tensión. Se han obtenido implementaciones prácticas que se aproximan a las llaves ideales en distinto grado y aspectos, y que se adaptan a distintos tipos de convertidores. En los capítulos siguientes se detallan las implementaciones físicas correspondientes.

