

Unidad 9

ELECTRÓNICA DE POTENCIA

ELECTROTECNIA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

(INGENIERÍA MECÁNICA)

M - 14

Ing. Julián J. Ronco (Prof. Adj.)

Ing. Jorge C. Ronco (Prof. Adj.)

Mauro Curli (Aux.)

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

9.1 Introducción a la electrónica

Una definición de Electrónica

La Electrónica es el campo de la ingeniería y de la física aplicada al diseño y aplicación de dispositivos, por lo general circuitos electrónicos, cuyo funcionamiento depende del flujo de electrones para la generación, transmisión, recepción y almacenamiento de información.

9.1.1 Conceptos generales

Vamos a repasar rápidamente algunas leyes básicas y teoremas fundamentales para el desarrollo de circuitos electrónicos.

Ley de Ohm

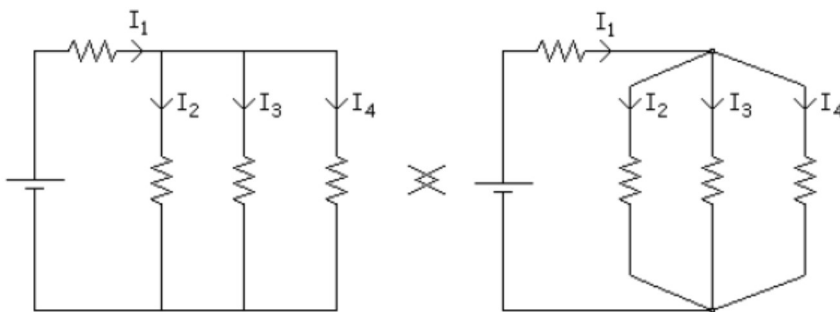


$$V[V] = R[\Omega] \cdot I[A]$$

Leyes de Kirchhoff

- *1ª Ley de Kirchhoff* - La suma de corrientes entrantes en un nodo es igual a la suma de corrientes salientes del nodo:

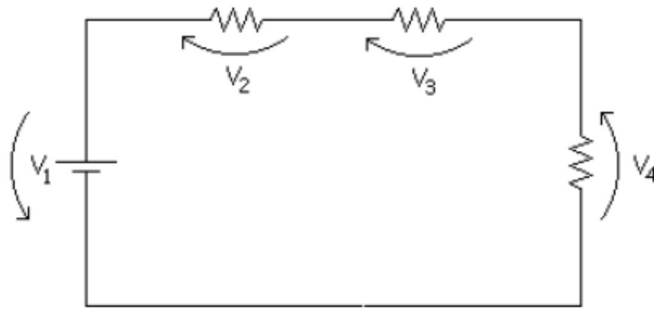
$$\sum I_{\text{ENTRANTES}} = \sum I_{\text{SALIENTES}}$$



$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

- *2ª Ley de Kirchhoff* - La suma de las caídas de tensiones de todos los componentes de una malla debe ser igual a cero:

$$\sum V = 0$$



$$V_2 + V_3 + V_4 - V_1 = 0$$

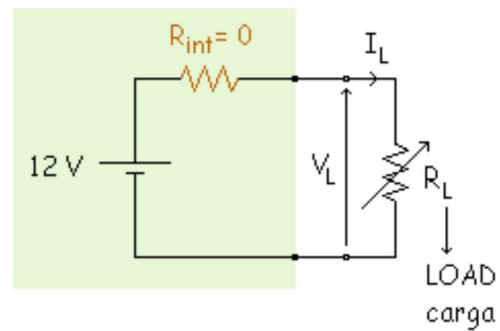
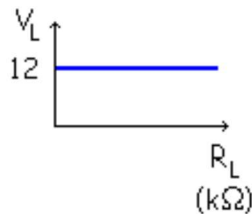
Fuentes de tensión

Los circuitos electrónicos deben poseer para su funcionamiento adecuado de al menos una fuente de energía eléctrica, que debe ser una fuente de tensión o de corriente.

- **Fuente de tensión ideal**

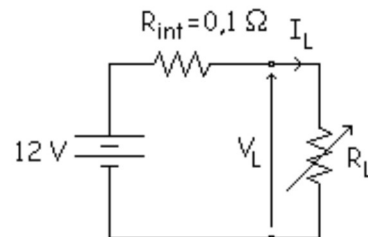
Es una fuente de tensión que produce una tensión de salida constante, con $R_{int.} = 0$. Toda la tensión va a la carga R_L .

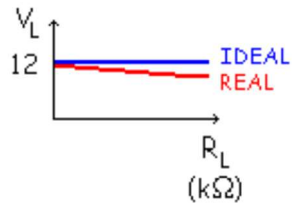
$$V_L = 12V \text{ (cte)} = R_L \cdot I_L$$



- **Fuente de tensión real**

Toda fuente de tensión real posee cierta $R_{int.}$. A medida que varía R_L varía I_L , variando también la caída de tensión en $R_{int.}$, por lo que la tensión en la carga V_L no será constante:





$$I_L = \frac{12}{0,1 + R_L}$$

$$V_L = R_L \cdot \frac{12}{0,1 + R_L} \neq \text{cte}$$

- **Fuente de tensión (aproximadamente) constante**

Para que una fuente de tensión sea considerada constante, la R_{int} debe ser despreciable, esto es:

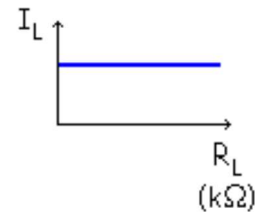
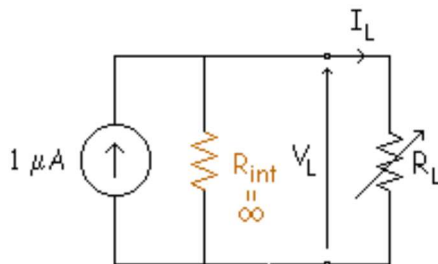
$$R_{int} \leq R_L / 100$$

De esta forma se pierde sólo el 1% aproximadamente entre la tensión en la fuente y la que realmente llega a la carga.

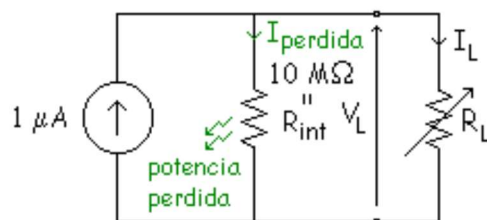
Fuentes de corriente

A diferencia de las fuentes de tensión, la R_{int} de una fuente de corriente será muy grande, de tal forma que su corriente producida sea independiente del valor de la resistencia de carga R_L .

- **Fuente de corriente ideal**



- **Fuente de corriente real**

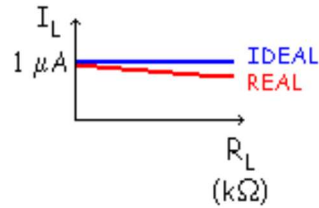


$$V_L = 1 \cdot (10 // R_L)$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{1 \cdot (10 // R_L)}{R_L} \neq \text{cte}$$

en carga $I_L < 1 \mu A$

La intensidad de carga tendrá la siguiente forma:



- **Fuente de corriente (aproximadamente) constante**

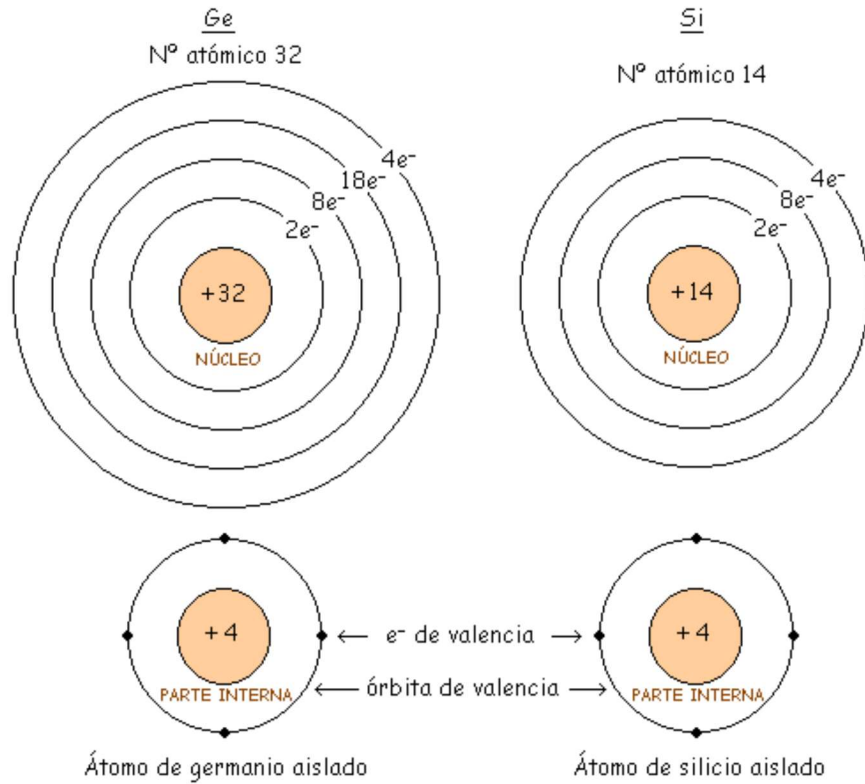
Estas son las fuentes que poseen la siguiente relación: $R_{int} \geq R_L \cdot 100$ donde en el peor de los casos se pierde el 1% por la R_{int} .

9.1.2 Estructura física de los semiconductores

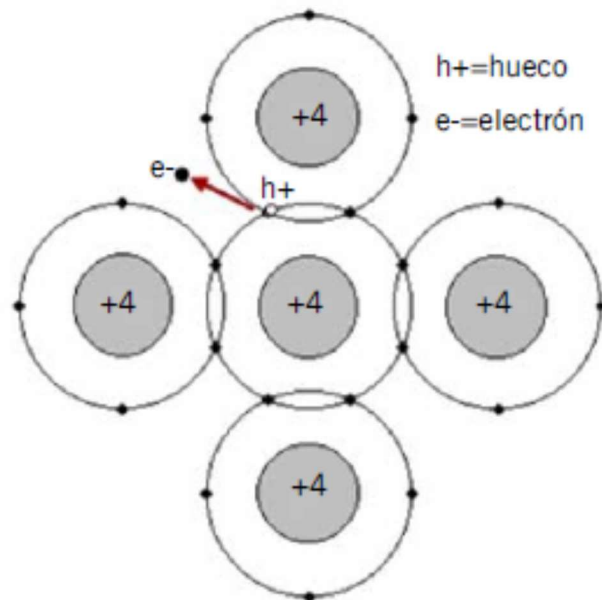
Un material semiconductor es un material aislante que puede comportarse como un conductor si se le suministra una pequeña cantidad de energía (un pequeño voltaje).

Son elementos, como el germanio y el silicio, que a bajas temperaturas son aislantes. Pero a medida que se eleva la temperatura, o bien por la adición de determinadas impurezas, resulta posible su conducción. Serán sumamente importantes en la fabricación de diodos, transistores, circuitos integrados, etc...

Los semiconductores tienen valencia 4, esto es 4 electrones en órbita exterior ó de valencia. Los conductores tienen 1 electrón de valencia, los semiconductores 4 y los aislantes 8 electrones de valencia.



Vamos a representar un cristal de silicio de la siguiente forma:



El aumento de la temperatura hace que los átomos en un cristal de silicio vibren dentro de él; a mayor temperatura mayor será la vibración. Esta vibración permite que un electrón se pueda liberar de su órbita, dejando un hueco, que a su vez atraerá otro electrón, etc...

Semiconductores extrínsecos

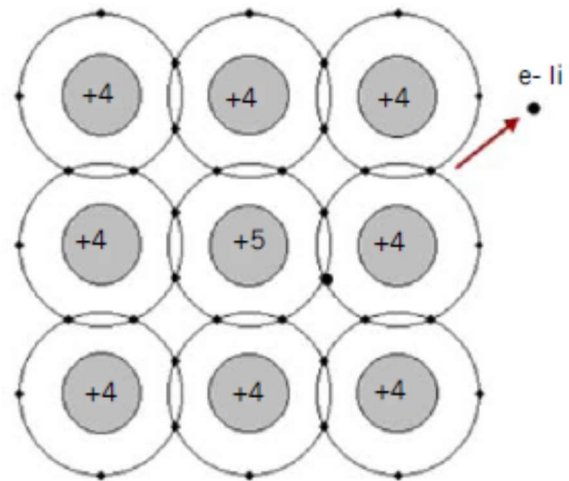
Para aumentar la conductividad de un semiconductor, se le suele dopar o añadir átomos de impurezas a un *semiconductor intrínseco* (semiconductor puro que a temperatura ambiente se comporta como un aislante), recibiendo el nombre de *semiconductor extrínseco*.

Existen 2 casos de semiconductores extrínsecos:

- **Semiconductores de tipo N (negativo)**

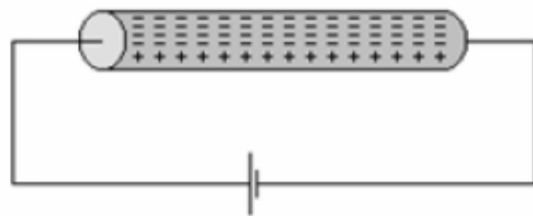
Aquellos dopados o combinados con átomos de valencia 5 (Arsénico, Antimonio, Fósforo), llamadas "impurezas donadoras", negativas o pentavalentes.

Los átomos de valencia 5 tienen un electrón de más. Por consiguiente, con una temperatura no muy elevada (temperatura ambiente por ejemplo), el quinto electrón se hace electrón libre. Esto es, como solo se pueden tener 8 electrones en la órbita de valencia, el átomo pentavalente suelta un electrón que será libre.



Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo n, reciben el nombre de "portadores mayoritarios", mientras que a los huecos se les denomina "portadores minoritarios".

Al aplicar una tensión al semiconductor de la figura, los electrones libres dentro del semiconductor se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. Cuando un hueco llega al extremo derecho del cristal, uno de los electrones del circuito externo entra al semiconductor y se recombina con el hueco.

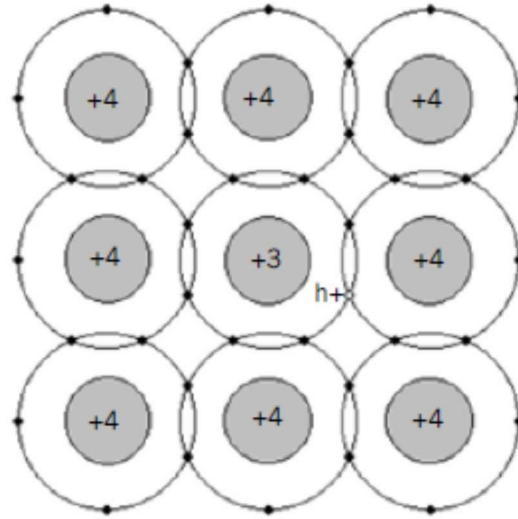


Los electrones libres de la figura circulan hacia el extremo izquierdo del cristal, donde entran al conductor y fluyen hacia el positivo de la batería.

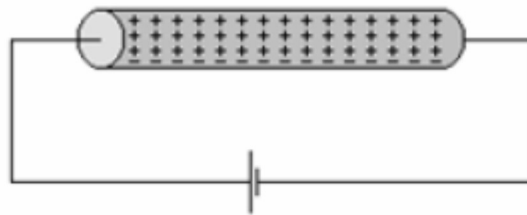
- **Semiconductores de tipo P (positivo)**

Aquellos dopados con átomos de valencia 3 (Aluminio, Boro, Galio), llamadas "impurezas aceptadoras", positivas o trivalentes, las cuales aportan un nuevo hueco al cristal de Silicio.

Los átomos de valencia 3 tienen un electrón de menos, por consiguiente, al faltar un electrón, tenemos un hueco. Como el número de huecos supera el número de electrones libres, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones libres son los minoritarios.



Al aplicarse una tensión, los electrones libres se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. En la figura, los huecos que llegan al extremo derecho del cristal se recombinan con los electrones libres del circuito externo.



En el circuito hay también un flujo de portadores minoritarios. Los electrones libres dentro del semiconductor circulan de derecha a izquierda. Como hay muy pocos portadores minoritarios, su efecto es casi despreciable en este circuito.

9.2 Tecnología y caracterización de dispositivos discretos

9.2.1 Componentes pasivos y activos

Componentes pasivos

Son aquellos componentes que actúan como meros receptores y consumidores de la señal eléctrica; no generan ni ganancia ni control de la señal eléctrica. Son resistores, condensadores y bobinas.

Componentes activos

Son componentes capaces de *generar, modificar o amplificar la señal eléctrica*. Algunos ejemplos de componentes activos son el **diodo** y el **transistor**, cuyo funcionamiento se basará en el *principio de funcionamiento de los semiconductores*.

9.2.2 Dispositivos electrónicos

Resistencias

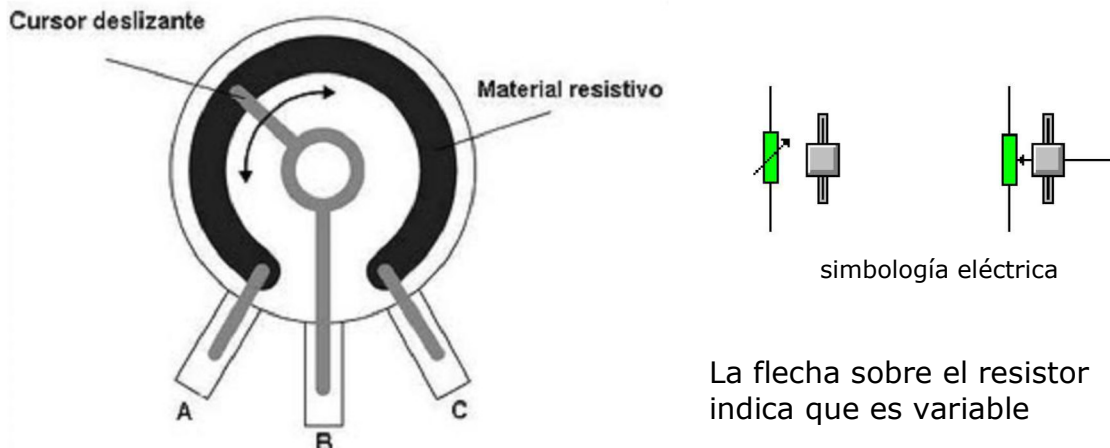
Las resistencias pueden clasificarse según su comportamiento eléctrico de la siguiente manera:

- **Resistencias fijas:** componente electrónico que proporciona un determinado valor de resistencia al paso de la corriente eléctrica.



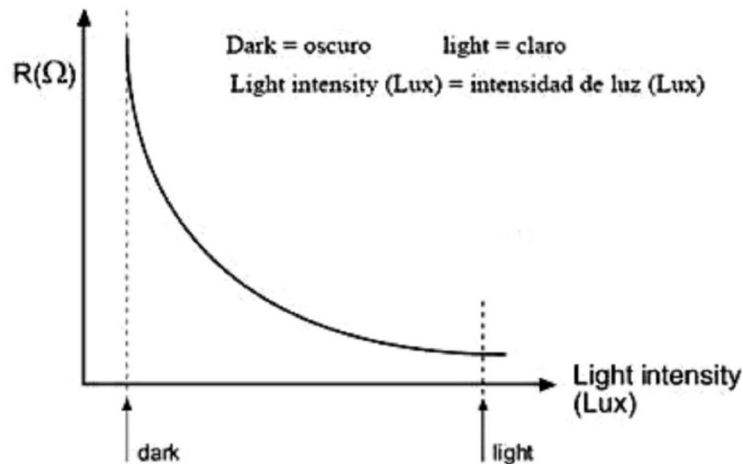
Aplicaciones en circuitos electrónicos:

- Proporcionar una resistencia conocida al paso de la corriente.
 - Limitar el valor de la corriente (protección de componentes frente grandes corrientes).
 - Controlar o fijar tensiones (polarizar circuitos).
- **Resistencias variables (o potenciómetros):** los resistores variables son resistores cuyo valor de resistencia se puede variar desplazando un cursor o girando un eje. De esta manera se modifica la resistencia que ofrece el resistor variable desde 0 hasta el valor máximo indicado en el cuerpo del resistor.



Aplicaciones en circuitos electrónicos:

- Los resistores variables se emplean como reguladores de intensidad, en aplicaciones de control de nivel de luminosidad, de sonido, etc.
- **Foto-Resistencias (LDR)**: son resistores cuya resistencia depende de la luz incidente:
 - En condiciones de oscuridad o poca luz, su resistencia es muy alta (deja pasar muy poca corriente).
 - En condiciones de iluminación, su resistencia es muy baja (deja pasar mucha corriente).



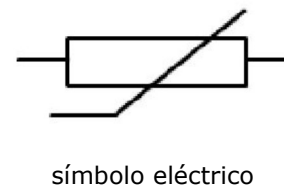
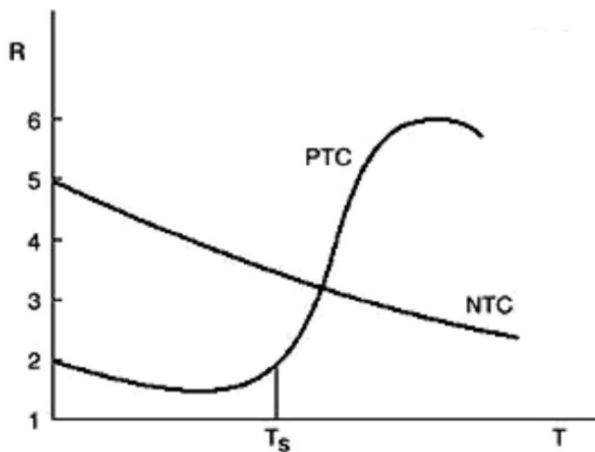


Aplicaciones en circuitos electrónicos:

- Los LDR se utilizan como sensores de luz, en aplicaciones como encendido/apagado automático de luces, detector de iluminación para flashes en cámaras de fotos, células fotoeléctricas, sistemas de alarma anti-intrusión, detector de humos, etc.
- **Termistores:** son resistores cuya resistencia depende de la temperatura a la que se encuentren.

Hay dos tipos de termistores:

- Los NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo), donde la resistencia disminuye al aumentar la temperatura.
- Los PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo), donde la resistencia aumenta al aumentar la temperatura.



Acompañado de $-T$ indica que es un NTC

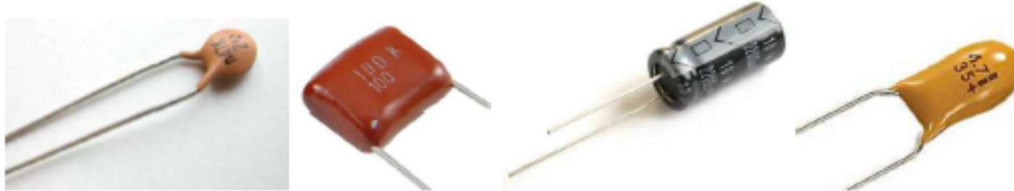
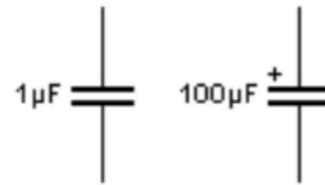
Acompañado de $+T$ indica que es un PTC

Aplicaciones en circuitos electrónicos:

- Los termistores más habituales son los NTC, y se utilizan como sensores de temperatura en termostatos, termómetros, circuitos de protección de aparatos eléctricos frente a la temperatura, detectores de incendios, etc.

Condensadores

Un condensador es un dispositivo electrónico pasivo, compuesto por dos placas metálicas (conductoras) separadas por un material aislante (dieléctrico).



Aplicaciones en circuitos electrónicos:

- Son componentes capaces de almacenar carga eléctrica, por lo que se comportan como "almacenes de energía eléctrica".
- El proceso de carga y descarga de energía de los condensadores los hace muy útiles como almacenes temporales de carga, en aplicaciones como temporizadores y retardadores (aunque también se utilizan como baterías, filtros, circuitos de comunicaciones, etc.)

La capacidad de un condensador es su parámetro más importante. Indica la cantidad de carga que un condensador puede almacenar en función de la tensión aplicada:

$$C [F] = Q / V$$

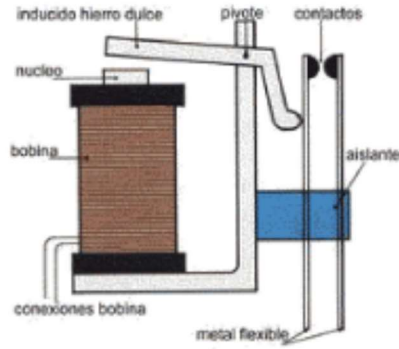
Los condensadores más habituales presentan capacidades de milifaradios (mF), microfaradios (F) o picofaradios (pF).

Relés o bobinas

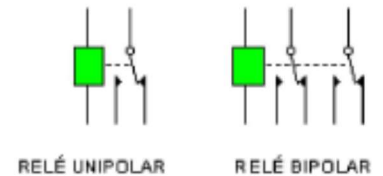
Un relé es un interruptor automático controlado por electricidad. Los relés permiten abrir o cerrar circuitos sin la intervención humana.



Relé comercial



Esquema interno de un relé



RELÉ UNIPOLAR

RELÉ BIPOLAR

Simbología eléctrica

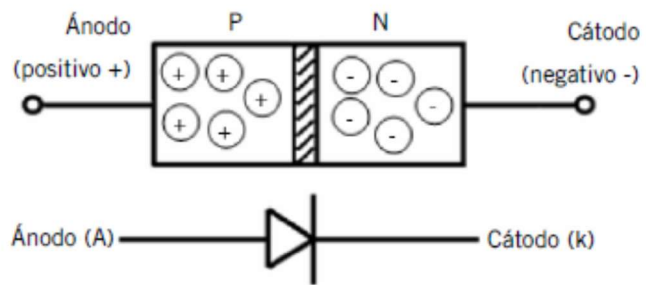
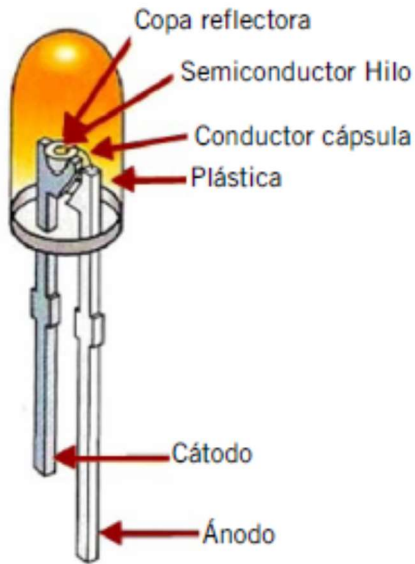
Su funcionamiento se basa en el magnetismo: al circular la corriente a través de la bobina, produce un campo magnético que atrae a la lámina metálica de hierro dulce. Al atraer la lámina metálica se fuerza a los contactos a tocarse, cerrando así el circuito eléctrico principal, dando lugar al paso de la corriente. Si cesa el flujo de corriente a través de la bobina, los contactos vuelven a separarse, abriendo el circuito principal.

Aplicaciones en circuitos electrónicos:

- Los relés son interruptores o conmutadores automáticos controlados eléctricamente, por lo que sus principales aplicaciones son automatismos, control de motores eléctricos, activación de circuitos de elevada potencia, etc.

9.2.3 Caracterización de diodos y aplicaciones

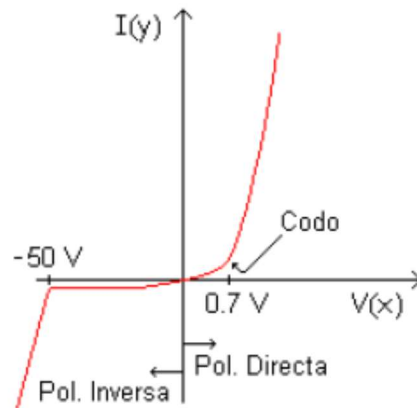
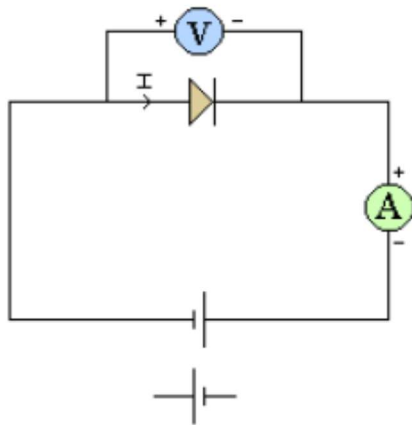
El diodo semiconductor es un componente electrónico activo que sólo permite que la corriente eléctrica pase a través de él en un solo sentido (el indicado por la flecha de su símbolo eléctrico). El material base en la construcción del diodo es el Cristal de Silicio.



Polarización directa: ánodo conectado al positivo de la alimentación: el diodo se comporta como un conductor y deja pasar la corriente eléctrica, oponiendo una resistencia casi nula.

Polarización inversa: ánodo conectado al negativo de la alimentación: el diodo se comporta como un aislante e impide el paso de la corriente eléctrica, presentando una resistencia enorme.

Curva característica del diodo



Como no es una línea recta, al diodo se le llama "**Elemento No Lineal**" ó "**Dispositivo No Lineal**", y este es el gran problema de los diodos para trabajar en mallas.

Debe tenerse en cuenta que en *polarización directa*, lo antes mencionado es válido solo si se supera una pequeña barrera que, dependiendo del material con que esté construido el diodo, puede valer entre 0,2V (Germanio) y 0,8V (0,7V para el Silicio) para los diodos comunes, y alrededor de 2 Volts para los diodos infrarrojos y diodos LED. A esta tensión se la denomina "Barrera de Potencial" ó "Tensión Umbral" y al punto en el que se vence dicha barrera de potencial se le llama "codo", a partir de ahí conduce mucho el diodo en directa. En la práctica, se coloca una resistencia en serie con el diodo, el cual posee una resistencia interna ($R_B = r_P + r_N$), con el fin de limitar la corriente que circula por el diodo y así no dañar al mismo. La máxima potencia que puede disipar un diodo, viene dada por el **límite máximo de corriente**.

En *polarización inversa*, si sigo aumentando la tensión puede ocurrir la ruptura a la tensión de ruptura, en este ejemplo a $V_R = -50 V$, aparece la avalancha y se dispara la corriente, destruyendo al diodo.

En polarización inversa tenemos una corriente formada por la suma de los valores de la corriente I_s (corriente inversa de saturación) y la corriente de fugas I_f (corriente superficial de fuga): $I = I_s + I_f$.

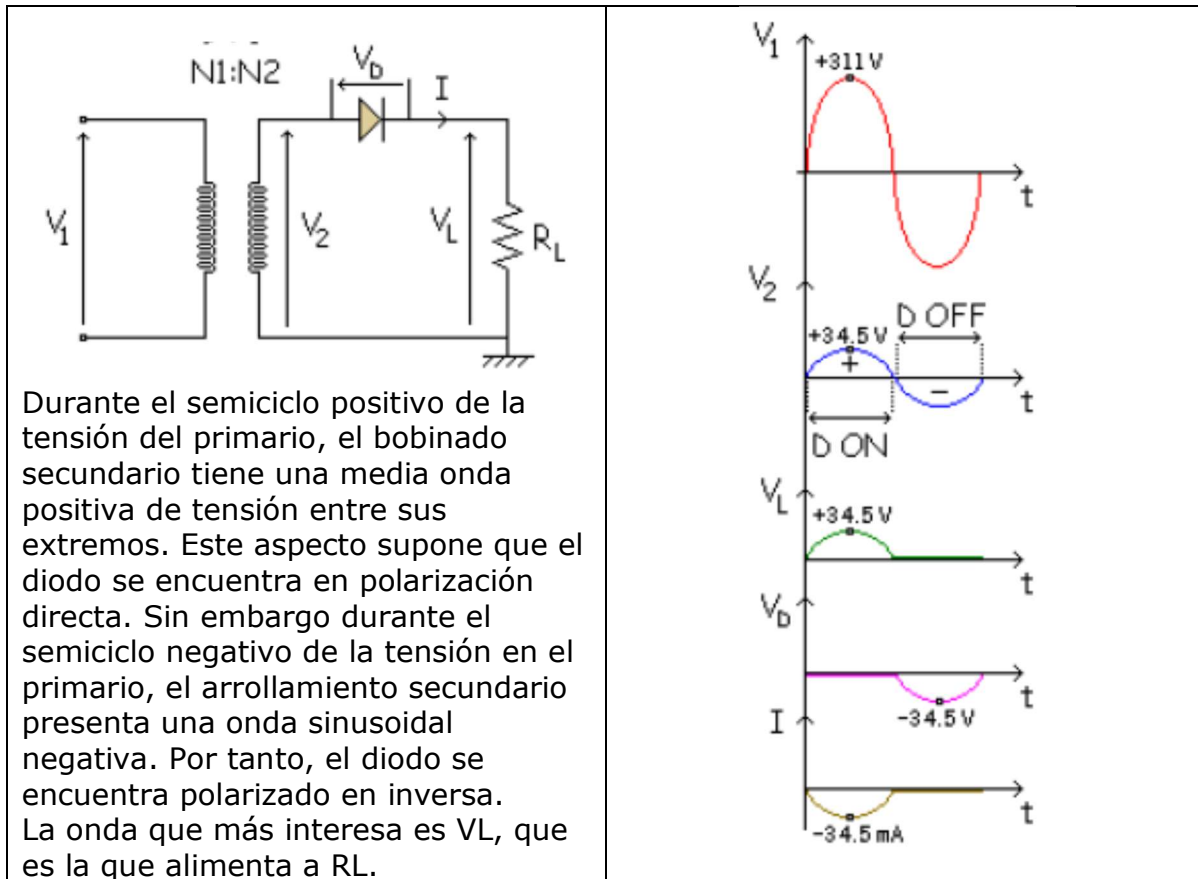
Aplicaciones

En función de lo visto hasta acá, el diodo puede ser aplicado como:

- *Rectificador*: conversión de corriente alterna (red de distribución) en corriente continua (alimentación). Es utilizado en fuentes de alimentación, cargadores, etc.
- *Detector*: es una aplicación en baja-señal y baja-potencia. En micrófonos modula la señal debido a que modifica la amplitud de las ondas de alta frecuencia generadas por el oscilador.
- *Limitador* (clamping): previene que la tensión en un punto exceda al voltaje presente en un segundo punto. Como ejemplo de esto es una válvula de seguridad que protege al transistor del daño que le causaría un transitorio de alto voltaje.

Todas estas aplicaciones, las que cubren casi el total de su implementación en circuitos industriales, hacen uso de su **propiedad de permitir solo el flujo de corriente eléctrica en un solo sentido**.

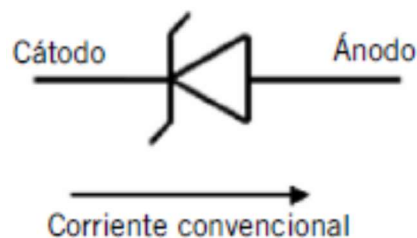
Ejemplo - Rectificador de media onda

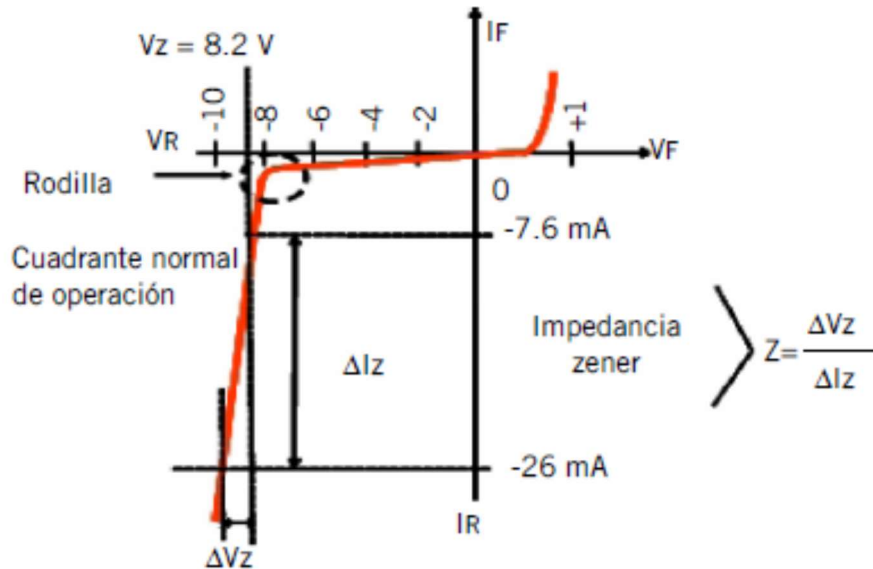


Diodos especiales – Diodos Zener

Estos diodos, llamados comúnmente diodos Zener, basan su funcionamiento en operar en la zona de ruptura y reciben el nombre de **diodos de disrupción**.

Son dispositivos que, **polarizados inversamente**, mantienen un determinado nivel de tensión y, por lo tanto, **trabajan como reguladores de tensión** y, cuando están polarizados directamente, trabajan como rectificadores.





- ✓ En polarización directa, el diodo Zener se comporta como un diodo normal y tiene características idénticas a las de un diodo rectificador de Silicio.
- ✓ En polarización inversa, el diodo Zener presenta una muy alta resistencia hasta alcanzar el punto de ruptura o tensión Zener. En el punto de ruptura, la característica del diodo cambia abruptamente, presentando una tensión prácticamente constante en un amplio rango de corriente en reversa.

Así, la **característica en reversa o polarización inversa del diodo Zener** sugiere su **aplicación como generador de referencia de tensión o como regulador** en casos donde se requiere una tensión constante.

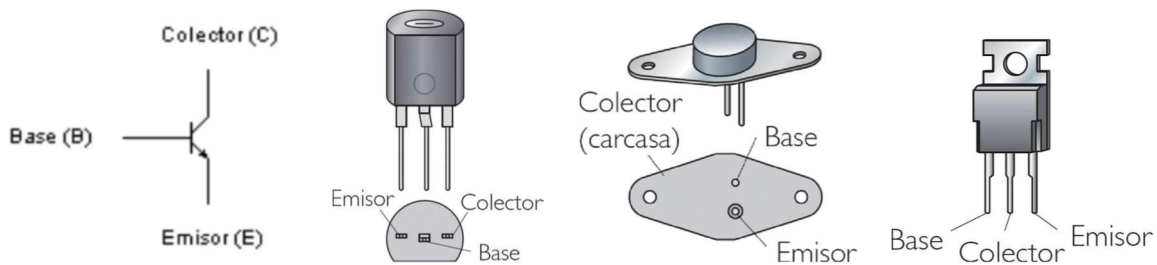
Las características más importantes de un diodo Zener son aquellas relacionadas con su operación en reversa o polarización inversa.

9.2.4 Caracterización de transistores y aplicaciones

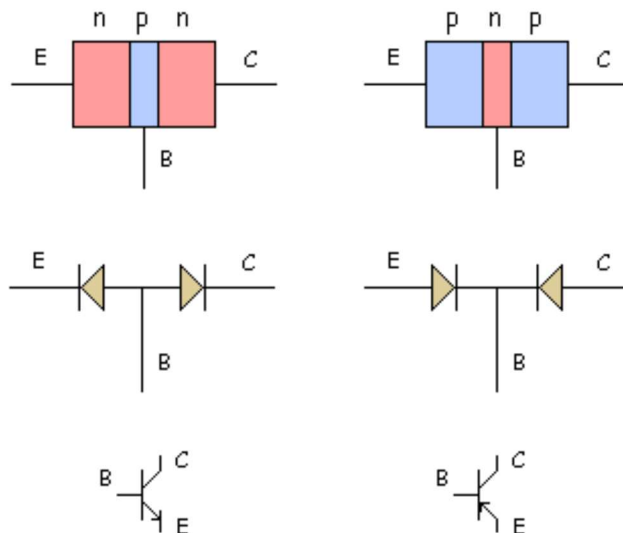
Los transistores son dispositivos semiconductores que se utilizan como **AMPLIFICADORES** o **INTERRUPTORES** controlados por una pequeña corriente (*corriente de base*), a diferencia de los diodos cuyo control es por tensión.

Simbología y terminales

El transistor tiene 3 terminales de conexión: Base (B), Colector (C) y Emisor (E). Su símbolo eléctrico normalizado es el que se indica a continuación:



Un transistor es similar a dos diodos, el transistor tiene dos uniones: una entre el emisor y la base y la otra entre la base y el colector. El emisor y la base forman uno de los diodos, mientras que el colector y la base forman el otro. Estos diodos son denominados: "Diodo de emisor" (el de la izquierda en este caso) y "Diodo de colector" (el de la derecha en este caso).



Funcionamiento básico del transistor

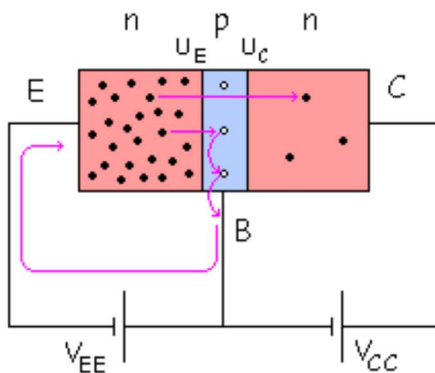
De forma simplificada, se puede decir que *el transistor se comporta como un interruptor controlado por la corriente que le entra por el terminal de Base*:

- 1- Si no llega corriente a la base, el transistor se comporta como un interruptor abierto: la resistencia entre colector y emisor es altísima (se comporta como aislante), la bombilla no recibirá corriente y no se encenderá.

- 2- Si le llega una pequeña corriente a la base (I_{BASE}), el transistor reduce drásticamente su resistencia entre colector y emisor (se vuelve conductor).
- 3- Como la resistencia entre colector y emisor se reduce, el transistor se comporta como un interruptor cerrado: circulará una corriente muy grande ($I_{COLECTOR}$) a la bombilla y se encenderá.
 La corriente de Colector muy alta (mucho más que la de Base), por lo que el transistor también **funciona como un amplificador**.

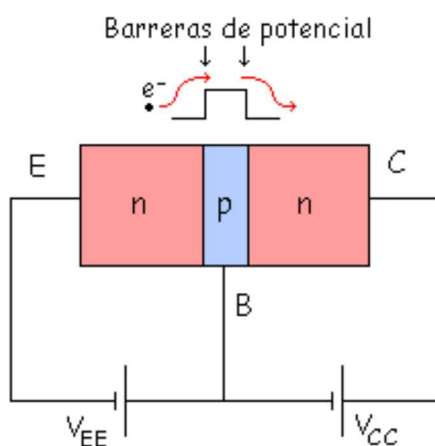
Además, el transistor permite controlar la magnitud de la gran corriente de Colector: **controlando el valor de la pequeña corriente que llega a la Base, se puede controlar la resistencia entre Colector y Emisor, y por tanto el valor de la corriente de Colector.**

Configuración en Base Común (BC)



El negativo de la pila VEE repele los electrones de la zona del emisor que cruzan la UE.

Algunos electrones cruzan la UE y pasan por la zona p de la base sin recombinarse. Debido a la pila puede que un electrón cruce la barrera de potencial de la UE. Después ese electrón baja la barrera de potencial de la UC para salir por el colector.



De n a p tiene que subir la barrera de potencial pero luego es más fácil porque tiene que bajar la barrera.

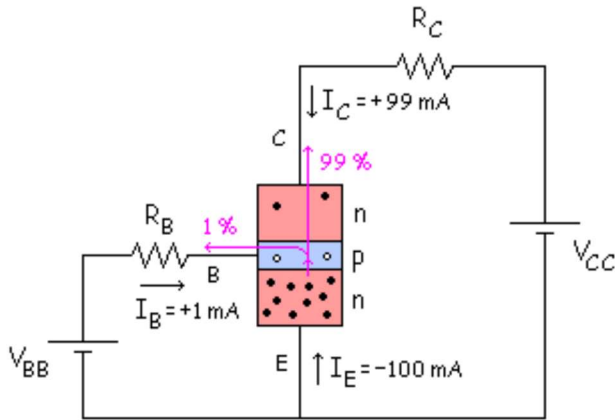
De los electrones emitidos por el emisor, aproximadamente un 1 % se recombina en la base y un 99 % no se recombina y llega al colector, **esto es el efecto transistor**. La palabra colector viene de ahí, el colector "Colecta" los electrones, los recoge, eso es el "Efecto transistor".

La base es muy estrecha y además está muy poco impurificada, esa es la razón de que la probabilidad de que un electrón se recombine sea muy pequeña (por ejemplo el 1%).

El emisor emite electrones, el colector los recoge, y la base es un dispositivo de control.

Configuración en Emisor Común (EC)

Esta es la configuración más utilizada, en la que se analizará a continuación, la zona activa:



Como en el caso anterior solo el 1 % se recombina y el 99 % no se recombina. La dirección de I_E la cambiamos por convención.

Es común despreciar la corriente de base I_B por ser muy pequeña en comparación con la corriente de colector I_C .

Tipos de transistores

- **Transistores de baja potencia**
También llamado de pequeña señal, son los transistores que tienen una intensidad pequeña (I_C pequeña), lo que corresponde a una potencia menor de 0,5W. En este tipo de transistores interesará obtener una **ganancia** de corriente ($\beta_{CC} = I_C/I_B$) grande.

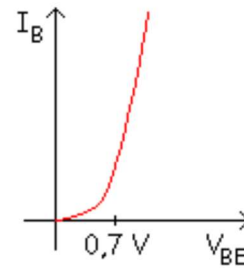
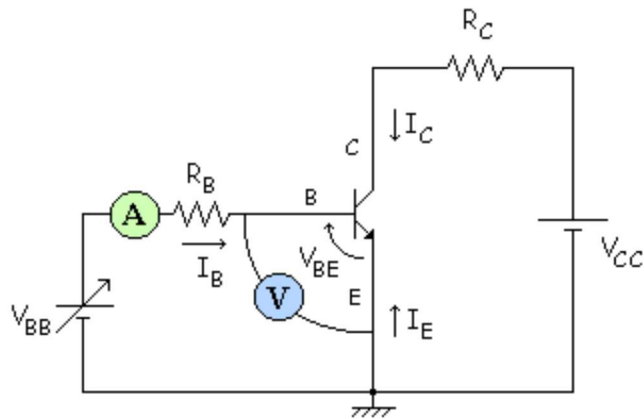
$$P_D = V_{CE} \cdot I_C \leq 0,5W$$

- **Transistores de potencia**
Son aquellos que tienen una intensidad grande (I_C grande), lo que corresponde a una potencia mayor de 0,5W. En este tipo de transistores la β_{CC} (o h_{FE}) que se puede obtener en su fabricación suele ser bastante menor que en los de baja potencia.

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C > 0,5W$$

Curva característica de entrada

Si variamos el valor de la pila V_{BB} de la malla de entrada, tomando valores de I_B y V_{BE} podemos obtener la característica de (la malla de) entrada.

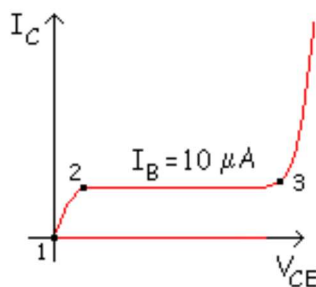
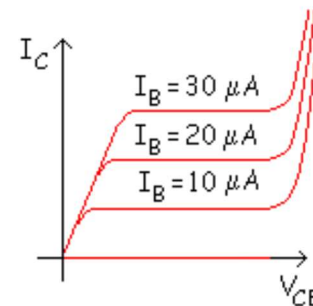
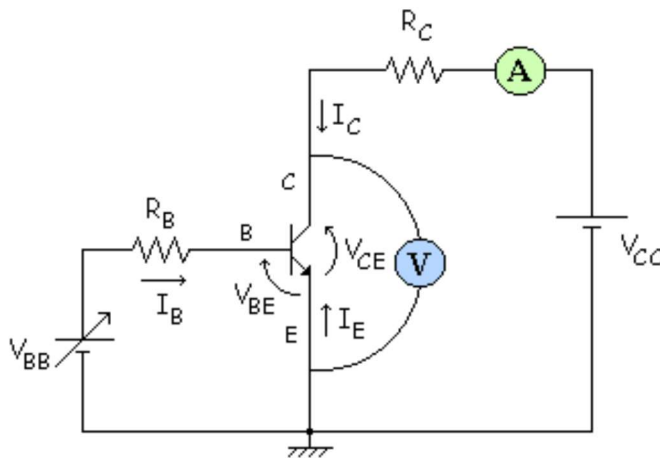


Como vemos, la característica del diodo base-emisor, y tiene una forma exponencial.

Curva característica de salida

Analizamos la malla de salida y **obtenemos distintas curvas para diferentes valores de I_B** .

Ajustando V_{BB} fijo un valor de I_B que voy a mantener constante (por ejemplo $I_B = 10 \text{ mA}$). Ahora **variando V_{CC}** mido valores de V_{CE} y I_C y obtengo la correspondiente curva de $I_B = 10 \text{ mA}$. Hago lo mismo para $I_B = 20 \text{ mA}$, etc... Y así sucesivamente para diferentes valores de I_B .



- Zona entre 1 y 2: **ZONA DE SATURACIÓN**
 - U_E directa
 - U_C directa
- Zona entre 2 y 3: **ZONA ACTIVA**
 - U_E directa
 - U_C inversa
- Zona a partir de 3: **ZONA DE RUPTURA (CORTE)**
 - U_E directa
 - U_C muy en inversa

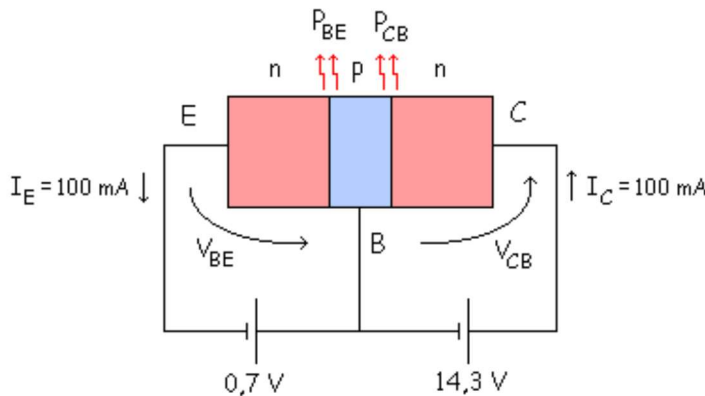
U_E = diodo E_B = Unión de Emisor.
 U_C = diodo C_B = Unión de Colector.

La zona de corte es desde $I_B = 0$ hacia abajo y no conduce. ($I_C = \beta_{CC} \cdot I_B$)

- La Zona Activa se utiliza en amplificadores y demás circuito lineales.
- Las zonas de Corte y Saturación se usan para conmutación (Corte abierto y Saturación cerrado)

Potencia disipada por el transistor

La potencia se disipa en las uniones. Veamos un ejemplo concreto:



$$P_{BE} = V_{BE} \times I_E = 0,7 \times 0,1 = 70\text{mW} \rightarrow \text{se suele despreciar respecto a } P_{CB}$$

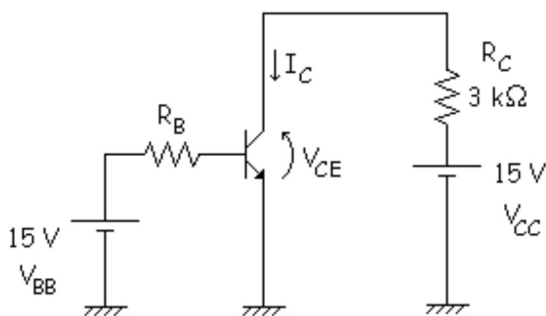
$$P_{CB} = V_{CB} \times I_C = 14,3 \times 0,1 = 1,43\text{W}$$

Por lo tanto,

$$P_D = V_{BE} \times I_E + V_{CB} \times I_C \approx I_C \times (V_{CB} + V_{BE}) = V_{CE} \times I_C$$

Aproximaciones para el transistor: vimos que las características de entrada y salida no son lineales, pero pueden adoptarse algunas aproximaciones para facilitar los cálculos.

Circuito de polarización de base



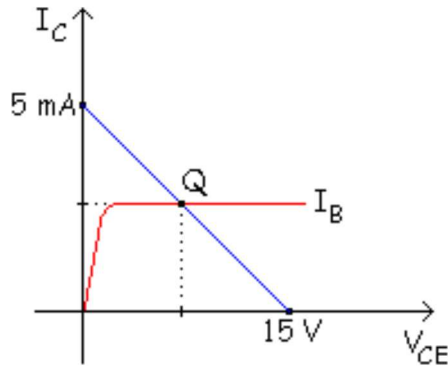
Malla de entrada:

$$-V_{BB} + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0 \rightarrow$$

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B$$

El valor de I_B depende del valor de R_B

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B = [(V_{CC} - V_{BE}) / R_B] \cdot \beta_{CC}$$



$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} \cdot V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

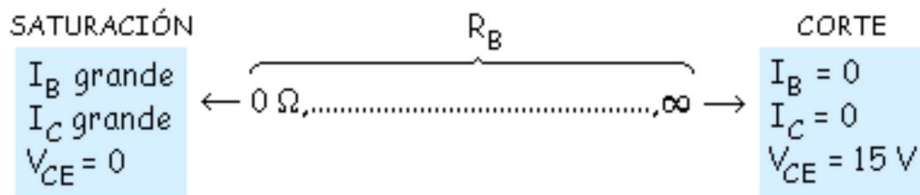
$y = m \cdot x + b$ es una recta

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{15}{3} = 5 \text{ mA}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 15 \text{ V}$$

El transistor puede así trabajar tanto como un amplificador (zona activa) como conmutador (saturación y corte).

El valor de I_B depende de la R_B , por lo tanto podemos controlar la posición del punto Q variando el valor de la R_B .

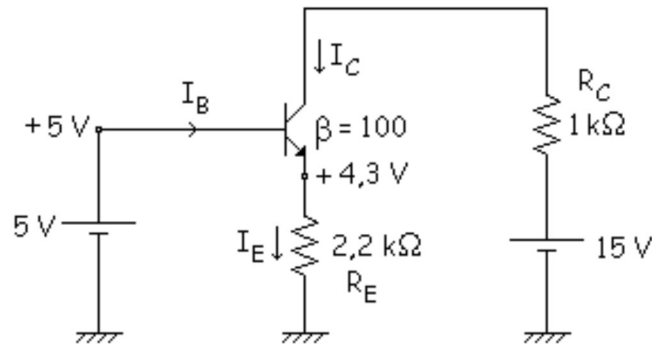


Sin embargo, este punto de trabajo Q será inestable, ya que variará cada vez que cambie la ganancia β_{CC} en el transistor, la cual puede variar por varias razones (temperatura, etc.).

Circuito de polarización de emisor

Si se quiere amplificar, se necesitan circuitos cuyos puntos Q sean inmunes a los cambios en la ganancia de corriente (β_{CC}), esto es, interesa que el punto Q sea lo más estable posible.

Y si el propósito es amplificar, el transistor tiene que trabajar en la zona ACTIVA.



Como estamos en activa $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, y V_C será de 4.3 V en la malla de entrada.

$$I_E = I_C = \frac{4.3}{2.2} = 1.95 \text{ mA}$$

La malla de salida:

$$-15 + 1 \cdot I_C + V_{CE} - 4.3 = 0 \implies V_{CE} = 8.8 \text{ V}$$

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} - R_E \cdot I_C = 0$$

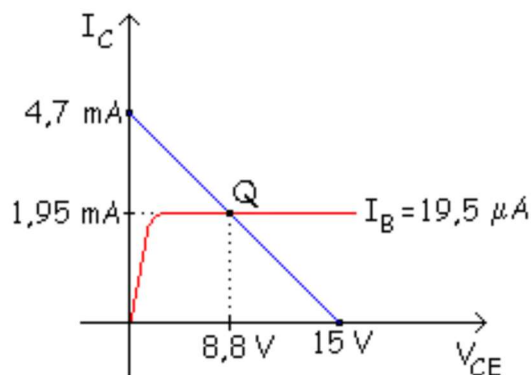
$$-V_{CC} + I_C \cdot (R_C + R_E) + V_{CE} = 0$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C + R_E} \cdot V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

$$V_{CE} = 0 \implies I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{15}{1 + 2.2} = 4.7 \text{ mA}$$

$$I_C = 0 \implies V_{CE} = V_{CC} = 15$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{CC}} = \frac{1.95}{100} = 19.5 \mu\text{A}$$



Ahora, si varía β_{CC} , por ejemplo: $\beta_{CC} = 150$, tenemos que:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{CC}} = \frac{1.95}{150} = 13 \mu\text{A}$$

varía la I_B , pero lo demás se mantiene y Q no varía, el transistor se autorregula y hace que varíe I_B sin que nada más varíe, por lo tanto:

"El punto Q es muy estable".

En todo este análisis se consideró despreciable I_B , adoptando $I_C = I_E$.

Suposición que para el trabajo del transistor en activa es aceptable.

Aplicaciones

El transistor resulta esencial en muchos circuitos electrónicos empleados para amplificar o controlar una señal eléctrica.

Una aplicación típica son los circuitos de automatismos: los sensores (LDR, NTC, etc.) normalmente generan una señal eléctrica muy débil, que es insuficiente para activar un receptor (relé, motor, altavoz, bombilla, etc.). En estos casos, la débil señal del detector se usa como corriente de base del transistor, para que resulte amplificada en la corriente de colector, y pueda activar el receptor.

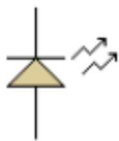
Existen variados circuitos de automatismos prácticos, en los cuales la corriente de Base no se controla manualmente mediante un potenciómetro, sino a través de LDR o NTC. En estos casos, la corriente de Base puede variar ante cambios de iluminación o temperatura, para controlar la corriente de Colector que activará dispositivos como luces, motores, relés, etc.

9.2.5 Dispositivos optoelectrónicos

Al estar relacionado con la luz, esta clase de dispositivos permiten convertir señales ópticas en señales electrónicas, y viceversa.

Alguno de estos dispositivos son los siguientes: diodo LED, display de 7 segmentos, fotodiodo, optoacoplador, etc.

➤ **Diodos LED - diodo emisor de luz**



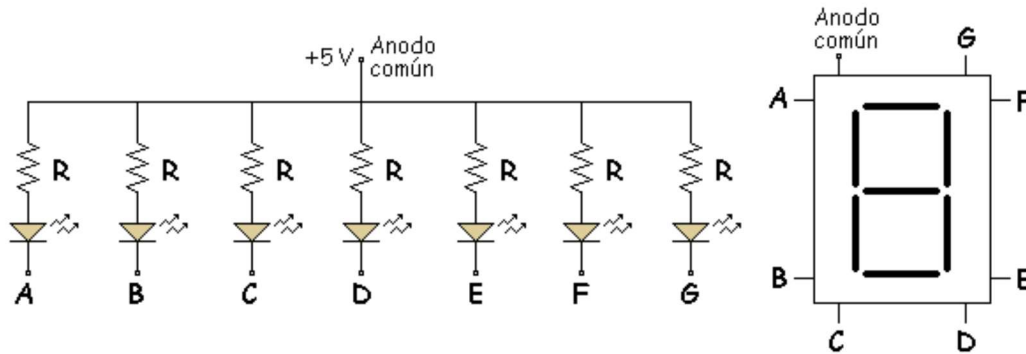
Polarización directa: el diodo LED deja pasar la corriente eléctrica y se ilumina.

Polarización inversa: el LED actúa como una barrera, no deja pasar la corriente eléctrica, y no se ilumina.

Diferencias con un diodo normal:

- la energía se desprende en forma de fotón en lugar de calor.
- en lugar de Si, éstos están hechos de As, P, Ga y aleaciones entre ellas; produciendo cada uno un color diferente por sus propiedades, y todos los colores (hasta de luz invisible al ojo humano), mezclándolos.

Display de 7 segmentos - Se utilizan 7 diodos LED



➤ **Fotodiodo**

Al contrario que el LED, éste recibe luz y se utiliza en polarización inversa, convirtiendo energía luminosa en energía eléctrica.

En un fotodiodo además de la generación térmica se le suma la "Generación por energía luminosa", que la crean los fotones que atacan cerca de la unión formando más pares hueco-electrón y por lo tanto más corriente:

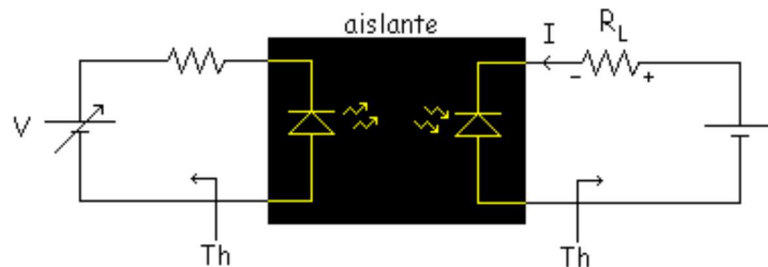
$$I = -I_S - I_f - I_{luz}$$

Para tener un mejor rendimiento, el fotodiodo se pinta de negro todo excepto cerca de la unión, que es donde interesa que se dé la luz. **A mayor iluminación, más cantidad de fotones, por lo tanto mayor será la corriente eléctrica generada.**

Una aplicación de los fotodiodos son las placas solares, los cuales utilizan una gran cantidad en paralelo para conseguir valores de energía más elevados.

➤ **Optoacoplador**

Es un encapsulado con 4 patillas, también de negro, para que no salga luz de dentro hacia fuera.



Si vario la pila varía ILED, varía la iluminación que recibe el fotodiodo, varía su corriente I. Esta variación de V afecta a la I y esta a la tensión en RL. El fotodiodo sirve para aislar, ya que pueden aparecer problemas al conectar directamente a la carga.

➤ **Fototransistor**

Un fototransistor es un elemento electrónico que se basa en la luz como el mecanismo de control de compuerta y regulador de corriente.

La mayoría de los fototransistores se fabrican con forma de un transistor bipolar, lo que significa que se utiliza una estructura de base-colector-emisor.

La principal diferencia es que el material semiconductor base está diseñado para que sea sensible a una fuente de iluminación.

A medida que los fotones entran en la estructura base, se convierten en un flujo de corriente que actúa como la corriente base que actúa para activar el transistor.

El fototransistor está alojado en una carcasa transparente para que la luz pase fácilmente.

A menudo, tienen carcasas que ayudan a mejorar y enfocar la entrada de luz a los componentes críticos y sensibles del transistor. Cuando la corriente de base está formada por luz de entrada, esto permite que una gran cantidad de corriente pase del emisor al colector.

Puesto que la luz actúa como un conmutador en el caso de un fototransistor bipolar, estos dispositivos se utilizan en muchos circuitos eléctricos que tienen importantes sensibilidades a la luz. Esto puede incluir alarmas de incendio y equipos de computadora como reproductores de CD o dispositivos infrarrojos.

9.2.6 Aplicaciones con dispositivos optoelectrónicos

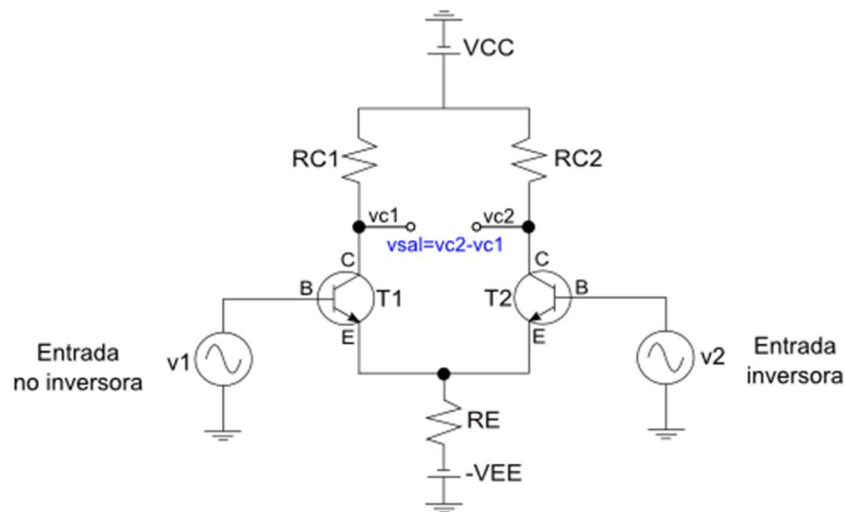
Sus aplicaciones son muy extensas y variadas, pero fundamentalmente se aplican en circuitos de comunicaciones, sistemas de señalización (semáforos, pantallas), productos de consumo masivo y emisores/detectores (mandos a distancia, emisores láser, sensores infrarrojos, etc.).

9.3 Tecnología y funcionamiento de sistemas electrónicos básicos de respuesta lineal

9.3.1 Principios de amplificación

Amplificadores diferenciales con transistores

Los transistores que lo conforman deben ser lo más parecidos posibles en sus propiedades, **de lo posible iguales**.



Un aumento de la tensión en la entrada V_1 provoca un aumento de I_{B1} , y por ende un aumento de $I_{C1} = \beta \cdot I_{B1}$. Lo mismo ocurre con $I_{E1} \approx I_{C1}$ (I_{B1} despreciable). Luego, la tensión en la resistencia R_C incrementa, lo que provoca una reducción de la tensión del colector o salida del transistor V_{O1} . Como la corriente I_O o I_{cola} debe permanecer constante ($I_O = I_{cola} = I_{E1} + I_{E2}$), el incremento de I_{E1} , hará que la corriente I_{E2} deba disminuir, disminuyendo por lo tanto la corriente I_{C2} . En este caso, la tensión en la resistencia R_C disminuye, a diferencia que en la salida del colector 1, lo que provoca un aumento de la tensión del colector o salida del transistor V_{O2} .

La tensión de salida viene dada por la diferencia $V_{SAL} = V_{O2} - V_{O1}$. Como la tensión de salida V_{O2} aumenta al aumentar la tensión de entrada V_1 , a la entrada V_1 se la conoce como **entrada no inversora**.

Análogamente, un incremento en la tensión de entrada V_2 , provocará una disminución en la tensión de salida V_{O2} , por lo que esta entrada recibe el nombre de **entrada inversora**.

La **tensión de salida** del transformador 2, V_{O2} , estará en fase con la de entrada V_1 , pero estará amplificada según lo que se conoce como ganancia del transistor 2, A_v :

$$V_{O2} = A_v \cdot V_1$$

De la misma forma: $V_{O1} = -A_v \cdot V_1$

Entonces: $V_{SAL} = V_{O2} - V_{O1} = A_v \cdot V_1 - (-A_v \cdot V_1) = 2 \cdot A_v \cdot V_1$

En caso de tomars solamente como tensión de salida a la tensión V_{O2} , esto se conoce como salida asimétrica, quedando:

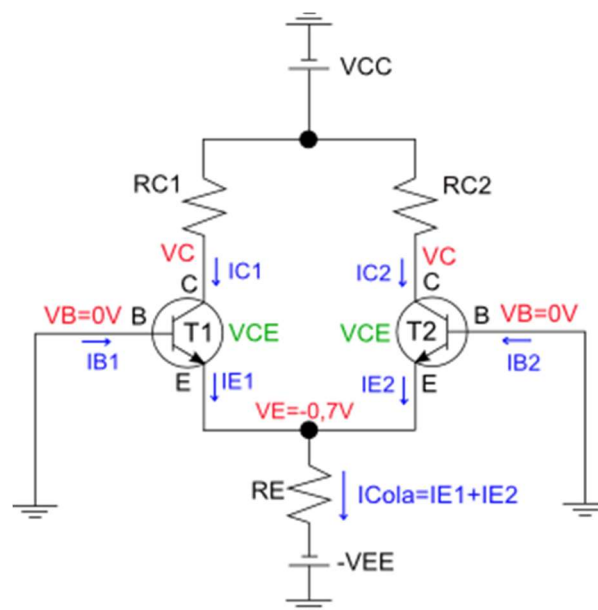
$$V_{SAL} = V_{O2} = A_v \cdot V_1$$

Para el análisis del amplificador diferencial, vamos a utilizar una sola entrada y salida, es decir, tanto la entrada como la salida serán asimétricas. Esto facilita los cálculos necesarios a realizar, pudiendo luego aplicar el principio de superposición con el resto de las variables del circuito.

Esto se consigue conectado la base del transistor 2 directamente a tierra, dejando alimentada mediante una señal alterna, únicamente la entrada no inversora. Luego se tomará únicamente como tensión de salida la originada entre el colector del transistor 2 y tierra, V_{O2} .

Análisis en continua

Se supondrá que las propiedades de ambos transistores son idénticas (eso en la práctica es difícil).



Al estar la base puesta a tierra ($V_B = 0$), y si el circuito está correctamente polarizado, se cumple que la tensión $V_{BE} = V_B - V_E = 0,7V$, por lo que $V_E = -0,7V$.

Para mantener el sentido de la corriente de cola, I_{cola} , es que la tensión V_{EE} debe ser negativa. Calculando ahora la tensión sobre R_E tenemos:

$$V_{RE} = V_E - (-V_{EE}) = -0,7 - (-V_{EE}) = R_E \cdot I_O \quad \rightarrow \quad I_O = (V_{EE} - 0,7) / R_E$$

Ahora:
$$I_E = (V_{EE} - 0,7) / 2R_E = (V_{CC} - 0,7) / 2R_E$$

➤ **Para salida asimétrica:**

$$V_{CE} = V_C - V_E = V_C + 0,7$$

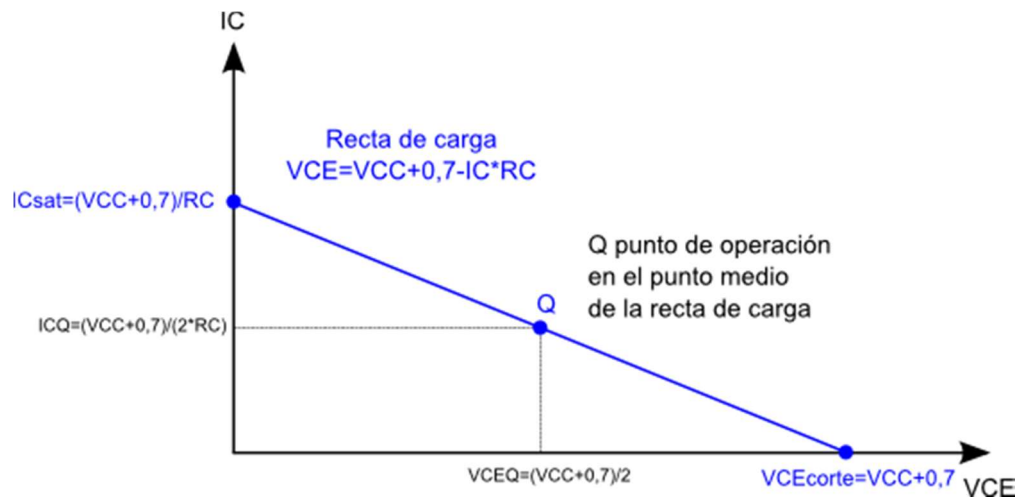
$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

La ecuación de Recta de carga cuando la salida es asimétrica, queda definida entonces como:

$$V_{CE} = V_{CC} + 0,7 - I_C \cdot R_C$$

Tensión de corte ($I_C = 0$): $V_{CE \text{ corte}} = V_{CC} + 0,7$

Corriente de saturación ($V_{CE} = 0$): $I_{C \text{ sat}} = (V_{CC} + 0,7) / R_C$



➤ **Para salida simétrica:**

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + I_{cola} \cdot R_E - V_{EE} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + 2 \cdot I_E \cdot R_E - V_{EE}$$

Pero $I_C \approx I_E$ y $V_{EE} = V_{CC}$, por lo tanto: $V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + 2 \cdot I_E \cdot R_E - V_{CC}$

La ecuación de la Recta de carga cuando la salida es diferencial queda:

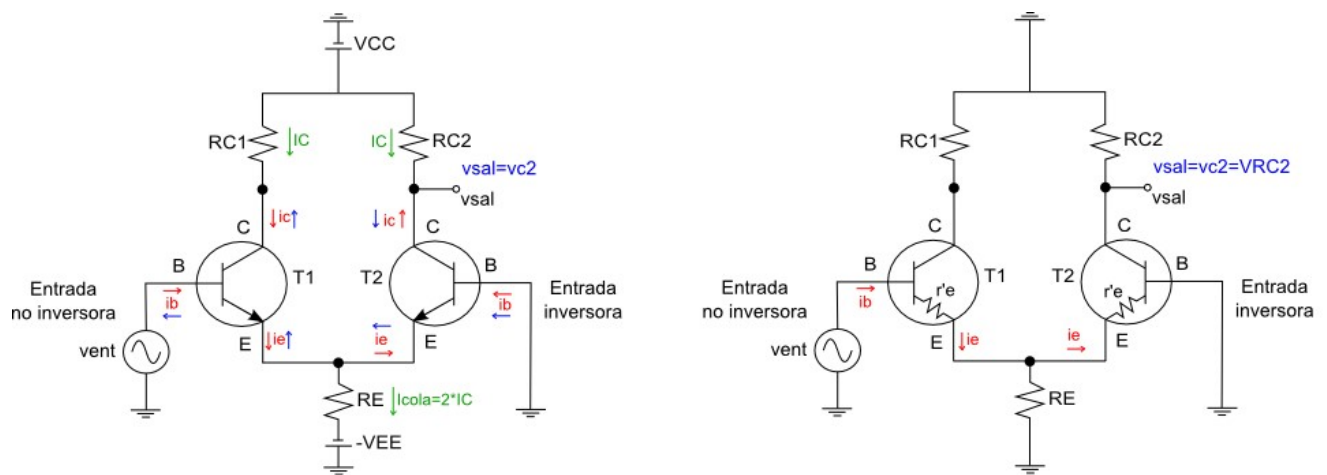
$$V_{CE} = 2 \cdot V_{CC} - I_C \cdot (R_C + 2 \cdot R_E)$$

Tensión de corte ($I_C = 0$): $V_{CE \text{ corte}} = 2 \cdot V_{CC}$

Corriente de saturación ($V_{CE} = 0$): $I_{C \text{ sat}} = 2 \cdot V_{CC} / (R_C + 2 \cdot R_E)$

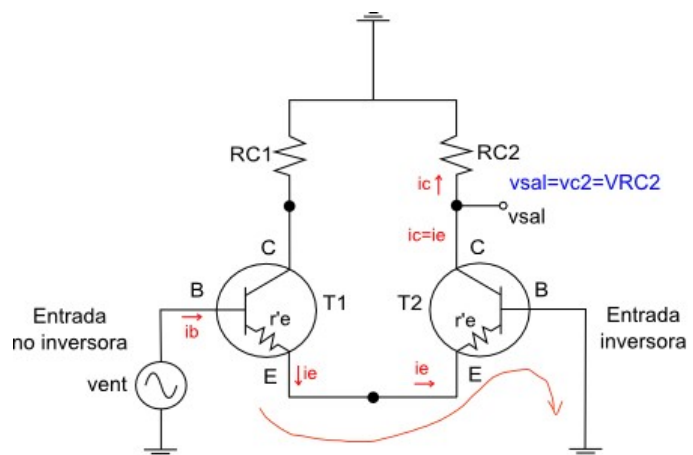
Análisis en alterna

A continuación se presenta el arreglo del circuito bajo análisis, junto con el **circuito equivalente para su análisis en alterna**, donde se ven pasivadas las fuentes de CC para el análisis:



El circuito ya está polarizado en continua, por lo que los valores de la corriente de polarización del colector I_C se conocen.

Para que se cumplan las condiciones matemáticas y se mantenga constante la I_{cola} , el valor de R_E tiene que ser mucho mayor que r_e' (resistencia interna del emisor) en el circuito equivalente de alterna. De esta manera, en alterna, R_E se puede considerar como un circuito abierto, como se ve en la figura:



En la imagen, para la señal de entrada alterna v_{ent} el color rojo es cuando la señal se hace positiva y el color azul cuando la señal se hace negativa. Cuando la señal se hace positiva entonces la corriente alterna $i_c = i_e$ aumenta, lo que hace que para T_1 su corriente de colector de polarización I_C aumente, ya que i_c e I_C tienen el mismo sentido. Esto hace que la tensión sobre R_{C1} aumente, lo que provoca que la tensión sobre el colector de T_1 disminuya, todo lo contrario ocurre cuando v_{ent} se hace negativo, por lo tanto la tensión sobre el colector de T_1 estará invertida con respecto a la tensión de entrada v_{ent} .

Sobre el otro transistor, mientras v_{ent} es positiva, la misma corriente i_c en rojo hará que para T_2 su corriente de colector de polarización I_C disminuya al tener i_c e I_C sentidos invertidos. Esto hace que la tensión sobre R_{C2} disminuya, lo que provoca que la tensión sobre el colector de T_2 aumente. Todo lo contrario ocurre cuando v_{ent} se hace negativo, por lo tanto la tensión sobre el colector de T_2 estará en fase con respecto a la tensión de entrada v_{ent} .

Analizando el ciclo positivo de v_{ent} tenemos:

$$v_{ent} = i_e \cdot r_{e'} + i_e \cdot r_{e'} = 2 \cdot i_e \cdot r_{e'}$$

$$v_{sal} = i_c \cdot R_{C2} \approx i_e \cdot R_{C2}$$

Ahora calcularemos la ganancia asimétrica:

$$A_{v_{asim}} = v_{sal} / v_{ent} = i_e \cdot R_{C2} / (2 \cdot i_e \cdot r_{e'}) = R_{C2} / (2 \cdot r_{e'})$$

Lo que es lo mismo: $v_{sal} = A_{v_{asim}} \cdot v_{ent} = v_{ent} \cdot R_{C2} / (2 \cdot r_{e'})$

Si se desea calcular la **tensión de salida diferencial**, esto es, utilizando las tensiones de los dos transistores, vimos anteriormente que se corresponde al doble de la asimétrica:

$$v_{sal\ dif} = 2 \cdot v_{sal\ asim} = (2 \cdot v_{ent} \cdot R_{C2}) / (2 \cdot r_{e'}) \rightarrow$$

$v_{sal\ dif} = (v_{ent} \cdot R_{C2}) / r_{e'}$
--

Por lo tanto, la ganancia diferencial será:

$A_{v_{dif}} = R_{C2} / r_{e'}$

Otro análisis posible:

$$v_{ent} = Z_{ent} \cdot i_b$$

donde Z_{ent} se la conoce como impedancia de entrada del **amplificador diferencial**

$$v_{ent} = Z_{ent} \cdot i_b = 2 \cdot i_e \cdot r_{e'}$$

además $i_e = i_c = \beta \cdot i_b \rightarrow Z_{ent} \cdot i_b = 2 \cdot \beta \cdot i_b \cdot r_e'$ de donde la impedancia de entrada del amplificador diferencial queda:

$$Z_{ent} = 2 \cdot \beta \cdot r_e'$$

Como se puede ver la impedancia de entrada del amplificador diferencial es el doble de la impedancia de entrada de un un amplificador de emisor común.

También, ee cumple:

$$v_{sal} = i_c \cdot Z_{sal} \quad \text{donde } Z_{sal} \text{ es la impedancia de salida del amplificador diferencial}$$

pero $v_{sal} = i_c \cdot R_C$ por lo que

$Z_{sal} = R_C$, que será un valor bajo comparado con la impedancia de entrada.

Si se utilizan ambas entradas y salidas del amplificador diferencial se puede hacer un análisis similar al realizado al transistor T1 para el transistor T2, luego por el principio de superposición se llegará a lo siguiente:

La tensión de salida será la diferencia entre $v_{sal} = v_{c2} - v_{c1} = A_v \cdot (v_{ent1} - v_{ent2})$

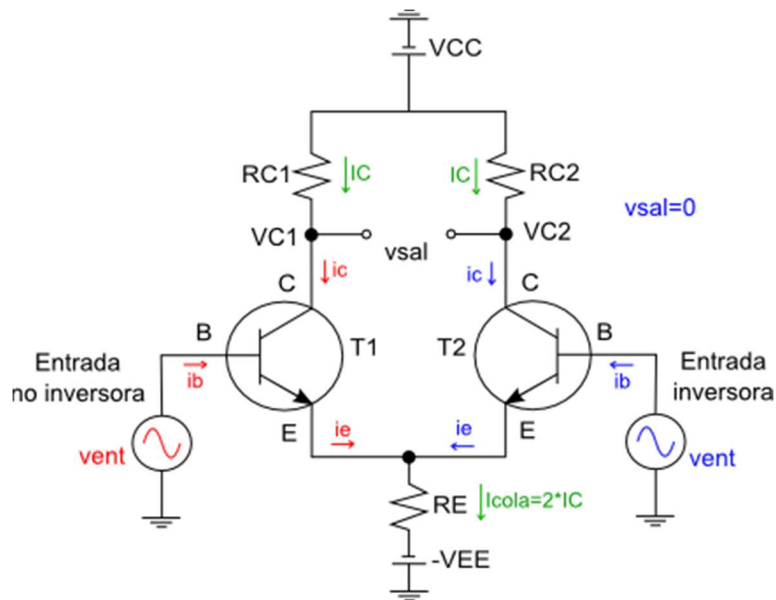
Para $R_{C1} = R_{C2} = R_C$ la ganancia de tensión es: $A_v = R_C / r_e'$; la ganancia es el doble que para el caso en que la salida es asimétrica.

La impedancia de entrada para cualquiera de los transistores será:

$$Z_{ent} = 2 \cdot \beta \cdot r_e'$$

Amplificador diferencial modo común

En modo común significa que en ambas entradas de un amplificador diferencial, estarán ingresando señales alternas iguales, tanto en fase, frecuencia como amplitud, como se ve en la siguiente figura:



vent=vent en fase en frecuencia y en amplitud

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL EN MODO COMÚN

El resultado teórico sería que la tensión de salida en este caso es cero.

Ambas tensiones de entrada ingresarán a las vez positivas o negativas a las entradas. En el caso del ciclo positivo de esta tensión, las corrientes de base y sus consecuentes corrientes de emisor, adquieren el sentido señalando en la figura, rojo para el T1 y azul para el T2.

Como ambas i_b tienen la misma amplitud y frecuencia, lo mismo ocurre con las i_e , pero como se ve, tendrán sentidos opuestos anulándose entre sí. Esto es lo que se conoce como el **rechazo al modo común**, en el cable que une los emisores de los transistores no habrá paso de corriente alterna, por lo cual no habrá cambio en las i_c , por lo que las señales comunes a ambas entradas no se amplifican, **siendo el valor de la $v_{sal} = 0$.**

Este fenómeno es muy importante en la utilización del amplificador diferencial, ya que **normalmente en el ambiente existe el ruido eléctrico o magnético que afectan a los circuitos.**

Este ruido ingresa al amplificador operacional por ambas entradas a la vez, y al tener las mismas frecuencias y amplitudes y estar en fase, el ruido se anula al salir de los emisores, por lo cual no es amplificado, amplificándose solo las señales de alterna que se desean.

En teoría $v_{sal}=0$, pero en realidad este valor aunque es muy pequeño no es cero, y esto se debe principalmente a que los β de los transistores no sean iguales *por lo que i_b no llegan a ser iguales aunque si cercanos.*

Al obtenerse una tensión de salida diferente de cero en el modo común, se dice que existe una *ganancia en modo común*, la cual se representa como A_{VMC} y tiene un valor aproximado de $A_{VMC} = R_C / (2 \cdot R_E)$.

Hay una relación que se conoce como el *factor de rechazo al modo común* simbolizado como CMRR que viene a ser $CMRR = A_v / A_{VMC}$, donde A_v es la ganancia diferencial encontrada anteriormente ($A_v = R_C / (2 \cdot r_{e'})$ si el amplificador es con entrada asimétrica y salida asimétrica, o $A_v = R_C / r_{e'}$ si es de entrada y salida diferencial).

9.3.2 El amplificador operacional (AO)

Hasta ahora hemos estudiado los componentes electrónicos discretos (diodos, transistores), que habitualmente se fabrican y encapsulan en unidades separadas, aptas para ser incorporadas en la fabricación de circuitos.

Ahora se introduce el concepto de ***circuito integrado***, en el cual *todos sus componentes se fabrican en el mismo bloque de silicio*. Con ello se consiguen múltiples ventajas:

- Reducción de tamaño
- Mayor fiabilidad, pues se eliminan todos los problemas asociados con la interconexión de los componentes
- Menor costo, si el número de circuitos fabricados es elevado

Uno de los circuitos integrados más empleados es el **Amplificador Operacional (AO)**. Es un circuito complejo *formado por muchos transistores y otros componentes en un solo circuito integrado de propósito general que puede emplearse en multitud de aplicaciones*.

*El amplificador operacional puede definirse sencillamente como un **amplificador diferencial de alta ganancia que utiliza realimentación para lograr niveles de amplificación precisos y estables.***

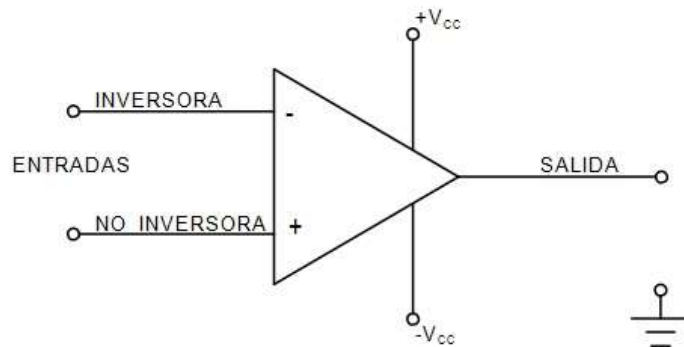


Figura 1

Para que este dispositivo pueda funcionar es obvio que necesitará una fuente de alimentación que polarice sus transistores internos.

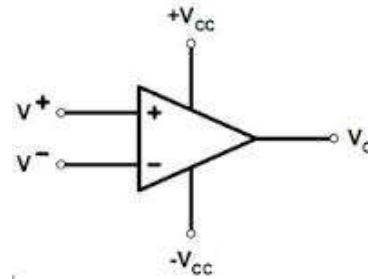
Habitualmente se emplean dos fuentes de alimentación, una positiva y otra

negativa. De este modo se permite que la salida sea de uno u otro signo. Evidentemente, **la tensión de salida nunca podrá superar los límites que marquen las alimentaciones**, ya que **el operacional está formado por componentes no generadores**.

9.3.3 Caracterización del AO

El operacional tiene cinco terminales:

- Entrada no inversora (V_+)
- Entrada inversora (V_-)
- Alimentación positiva (E_{CC})
- Alimentación negativa ($-E_{CC}$)
- Salida (V_{OUT})



Las características más relevantes del amplificador operacional son:

- *Impedancia de entrada muy elevada*: a menudo es mayor que $1M\Omega$.
- *Ganancia muy elevada*: mayor que 10^5 .

Las consecuencias que se derivan de estas características son:

- La corriente de entrada es muy pequeña o casi nula. Al ser la resistencia de entrada tan elevada, la corriente que circula por los terminales inversor y no inversor puede despreciarse.
- La ganancia puede considerarse infinita.

Ecuaciones básicas:

- ✓ Tensión de entrada en modo diferencial: $V_d = V_+ - V_-$
- ✓ Tensión de entrada en modo común: $V_c = (V_+ + V_-) / 2$
- ✓ Tensión de salida: $V_o = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$
- ✓ Relación de rechazo en modo común: $CMRR = A_d / A_c$
 $CMRR(dB) = 20\log(A_d/A_c)$

Donde:

- A_d es la ganancia en modo diferencial (la brinda el fabricante)

- A_c es la ganancia en modo común

$$V_o = A_d \cdot V_d \cdot (1 + V_c / (CMRR \cdot V_d))$$

El AO Ideal

Para abordar el análisis de diferentes circuitos, se recurre a la utilización del AO ideal, el cual aplica algunas aproximaciones al AO real, sin incurrir en importantes errores:

- 1) Resistencia de entrada ∞
- 2) Resistencia de salida 0
- 3) Ganancia en tensión en modo diferencial ∞
- 4) Ganancia en tensión en modo común 0 ($CMRR = \infty$)
- 5) Corrientes de entrada nulas ($I_+ = I_- = 0$)
- 6) Ancho de banda ∞
- 7) Ausencia de desviación en las características con la temperatura

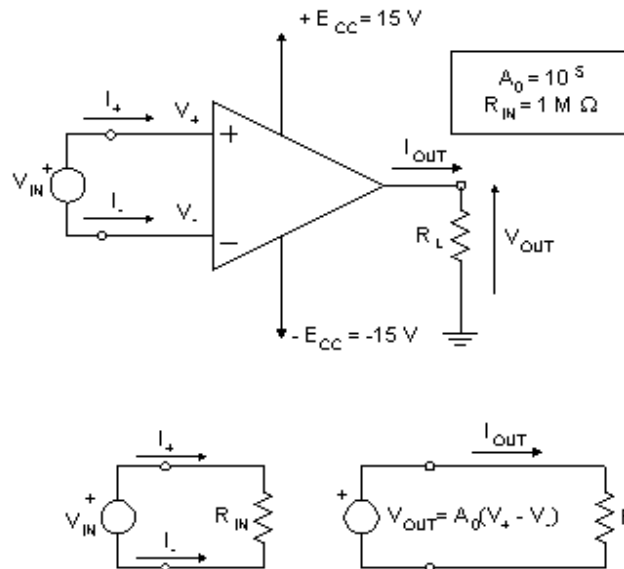
Las características 1) y 2) definen, desde el punto de vista de impedancias, a un amplificador de tensión ideal que no está afectado por el valor de la carga que se conecta a su salida. Esto es, funciona a lazo abierto.

Por otra parte, las características 4) y 5) aplicadas a la ecuación de V_o , crean una indeterminación ya que al ser $A_d = \infty \Rightarrow V_o = A_d \cdot V_d$ debería ser infinito. Sin embargo, esa indeterminación se resuelve cuando $V_d = 0$; el producto $A_d \cdot V_d$ da como resultado un valor finito. Por ello, la entrada del AO ideal tiene corrientes de nulas ($I_+ = I_- = 0$).

El modelo del AO ideal solo es un concepto idealizado del OA real que sin embargo resulta muy práctico y se acerca con mucha exactitud al comportamiento real de estos circuitos. Utilizaremos estas aproximaciones para el abordaje de algunos circuitos sencillos.

Funcionamiento en lazo abierto

Sin realimentación el amplificador operacional se caracteriza por una gran amplificación de tensión, impedancia de entrada alta y baja impedancia de salida. La siguiente figura muestra un esquema en el que el operacional funciona en lazo abierto, es decir, la entrada es independiente de la salida:



En el sencillísimo circuito de la figura, es muy fácil determinar las corrientes y tensiones:

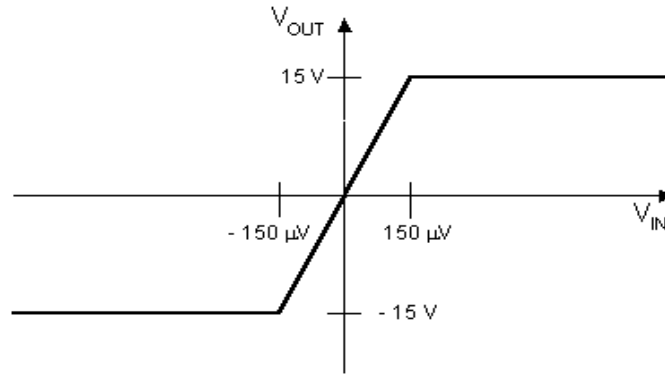
$$I_+ = -I_- = V_{IN} / R_{IN} = V_{IN} \cdot 10^{-6}$$

$$V_{OUT} = A_0 \cdot V_{IN} = V_{IN} \cdot 10^5$$

$$I_{OUT} = V_{OUT} / R_L$$

Ejemplo: si $V_{IN} = 15\mu V \rightarrow I_+ = 15 \cdot 10^{-6} A$; $V_{OUT} = 1,5V$. La corriente de entrada es despreciable. Vamos a aceptar siempre que: $I_+ = I_- = 0$

La tensión de salida es proporcional a la de entrada. Si $V_{IN} = 100\mu V \Rightarrow V_{OUT} = 10V$. Pero si $V_{IN} = 200\mu V$, según la fórmula obtenida, V_{OUT} sería de 20V, pero no olvidemos que la alimentación es de 15V, es decir, **la salida no puede superar los 15V**. A partir de $150\mu V$ en la entrada, por mucho que aumentemos la tensión no obtendremos más de 15V en la salida: **el amplificador se satura**. En la siguiente figura se representa la curva $V_{IN} - V_{OUT}$ de este ejemplo:



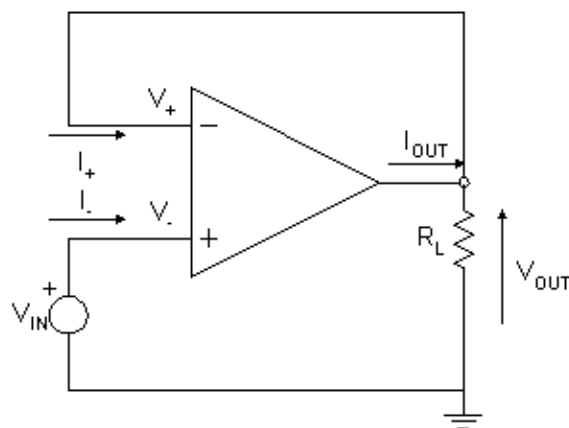
El funcionamiento como amplificador en lazo abierto presenta varios inconvenientes:

- El intervalo de tensiones que pueden amplificarse es muy pequeño (en el ejemplo $150 \mu V$). **El amplificador se satura con gran facilidad.**
- **La tensión de salida depende directamente de la ganancia del operacional.** Este parámetro tiene fuertes dispersiones de unos componentes a otros.

Por estos motivos, nunca se emplea este esquema cuando se quieren amplificar señales mediante operacionales. En la práctica cualquier señal provoca la saturación.

Circuitos con realimentación

El concepto de ***realimentación*** implica que la entrada del amplificador operacional **no es independiente de la salida**. Parte de la señal de salida se aplica a la entrada, con lo que ***se puede controlar la ganancia***.



Circuito – Seguidor de tensión

Analizaremos el caso simple de la figura que corresponde al circuito "Seguidor de tensión": la tensión de salida debe estar comprendida entre los límites de la alimentación (15 V, por ejemplo). Si esto es así, la diferencia entre las entradas puede ser, como mucho, la alimentación entre la ganancia (15/10000). Este valor suficientemente pequeño como para poder despreciarse frente al resto de magnitudes del circuito.

$$V_- = V_{IN}$$

$$V_+ = V_{OUT}$$

Teniendo que:

$$I_+ = I_- = 0$$

$$V_{OUT} = A_0 \cdot (V_+ - V_-)$$

Sustituyendo: $V_{OUT} = A_0 \cdot (V_{OUT} - V_{IN}) \rightarrow V_{OUT} = V_{IN} \cdot A_0 / (A_0 - 1)$

Al ser A_0 muy grande (considerada infinito para el caso ideal), tenemos que $V_{OUT} = V_{IN}$, y podemos concluir que: $e_+ = e_-$.

Como se ve en la figura, **se puede apreciar que la realimentación se aplica a la entrada inversora (-) (realimentación degenerativa).**

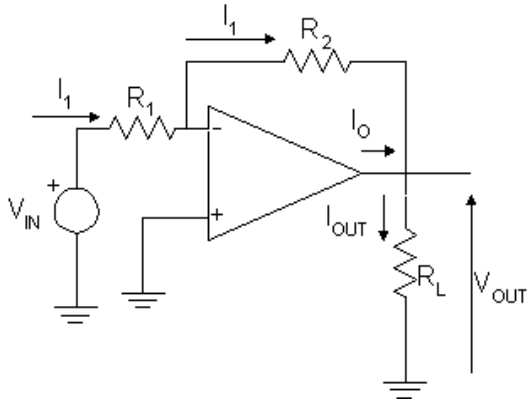
Esta es una condición necesaria para que el circuito funcione correctamente en la práctica.

Si se aplica una realimentación regenerativa (+) el amplificador operacional se saturará inmediatamente.

El razonamiento es muy simple: supongamos que en los cables de realimentación se capta una interferencia del exterior. Si la realimentación es regenerativa, esta interferencia aparecerá como un aumento de la tensión de salida. El aumento de la tensión de salida provoca un aumento de la entrada, que vuelve a provocar un aumento de la salida.... no hay ningún recurso que atenúe la perturbación, **y se llegará a la saturación.**

9.3.4 Circuitos de aplicación lineal con AO

Amplificador Inversor



Ecuaciones del operacional:

$$I_+ = I_- = 0$$

$$e_+ = e_-$$

Ecuaciones del circuito:

$$e_+ = 0$$

$$e_- = V_{IN} - R_1 I_1 = 0 \rightarrow I_1 = V_{IN} / R_1$$

$$V_{OUT} = -I_1 \cdot R_2 = - (R_2 / R_1) \cdot V_{IN} \rightarrow \mathbf{A_v = - (R_2 / R_1)}$$

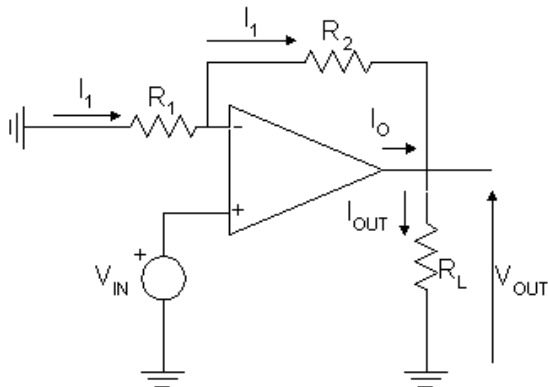
$$I_{OUT} = V_{OUT} / R_L = - (R_2 \cdot V_{IN}) / (R_L \cdot R_1)$$

$$I_o = I_{OUT} - I_1 = (R_2 \cdot V_{IN}) / (R_L \cdot R_1) + V_{IN} / R_1$$

Observaciones a destacar:

- **Ganancia del circuito independiente de la del operacional.**
- **Ganancia fijada por el cociente de dos resistencias.**
- **Impedancia de entrada en este circuito es R_1 .**
- **La entrada y la salida son de signo opuesto (inversor).**

Amplificador No-Inversor



Ecuaciones del operacional:

$$I_+ = I_- = 0$$

$$e_+ = e_-$$

Ecuaciones del circuito:

$$e_+ = V_{IN}$$

$$e_- = -R_1 I_1 \rightarrow I_1 = -e_- / R_1 = -V_{IN} / R_1$$

$$V_{OUT} = -I_1 (R_1 + R_2) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{IN} \rightarrow \mathbf{A_v = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$

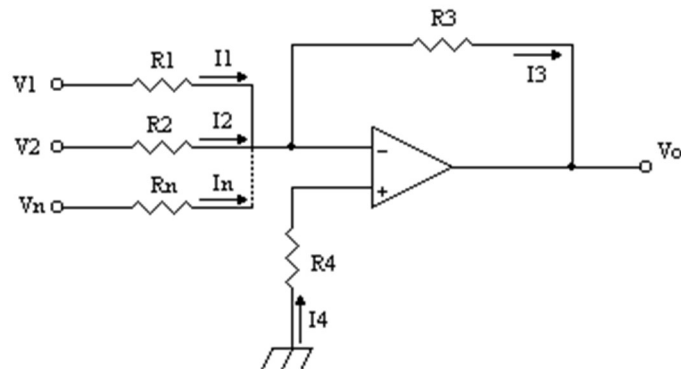
$$I_{OUT} = V_{OUT} / R_L = (1 / R_L) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{IN}$$

$$I_o = I_{OUT} - I_1 = (1 / R_L) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{IN} + V_{IN} / R_1$$

Observaciones a destacar:

- **Ganancia del circuito independiente de la del operacional.**
- **Ganancia fijada por el cociente de dos resistencias.**
- **Resistencia de entrada infinita.**
- **La entrada y la salida son del mismo signo (no inversor).**

Amplificador Sumador Inversor



$$I_4 = 0 \rightarrow V_{R4} = 0$$

$$I_1 = \frac{V_1 - 0}{R_1} ; I_2 = \frac{V_2 - 0}{R_2} ; I_n = \frac{V_n - 0}{R_n} ; I_3 = \frac{0 - V_o}{R_3}$$

$$I_3 = I_2 + I_1 + I_n \rightarrow \frac{-V_o}{R_3} = \frac{V_n}{R_n} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_1}{R_1}$$

$$V_o = -R_3 \left(\frac{V_n}{R_n} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_1}{R_1} \right) \Rightarrow V_o = - \left(V_1 \frac{R_3}{R_1} + V_2 \frac{R_3}{R_2} + \dots + V_n \frac{R_3}{R_n} \right)$$

9.4 Tecnología y funcionamiento de sistemas electrónicos básicos de respuesta no lineal

9.4.1 Circuitos electrónicos de respuesta no lineal

Un elemento lineal es aquel que se puede linealizar, es decir resolver con una ecuación lineal. Elementos lineales son las resistencias, los condensadores y las bobinas. Los condensadores y las bobinas son lineales, porque utilizando números complejos los resolvemos como si fueran resistencias. En teoría de circuitos, un **circuito lineal** es un circuito que para una tensión de entrada senoidal de frecuencia f , tiene una salida de tensión que también es senoidal con frecuencia f . **La salida no necesariamente debe estar en fase con la entrada.**

Por otra parte, un elemento **no lineal** es aquel que tiene una función que determina su comportamiento que no es lineal. **Son elementos no lineales los diodos, los transistores, los amplificadores...**

Ejemplo 1 (respuesta no lineal): circuitos rectificadores sencillos con diodos

Un circuito muy sencillo que permite obtener la parte positiva de una señal alterna es aquél que utiliza una resistencia y un diodo (figura 1).

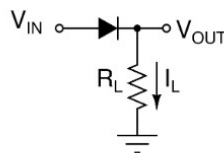


Figura 1: Rectificador sencillo con un único diodo.

Este circuito mantiene la parte positiva de la señal y rechaza la negativa, siendo llamado por ello **rectificador de media onda**. En caso de que el diodo fuera ideal, y no se produjeran caídas de tensión en él ni existieran corrientes de fuga, la tensión en el nodo de salida sería:

$$\begin{aligned} V_{IN} &; \text{ si } V_{IN} > 0 \\ 0 &; \text{ si } V_{IN} < 0 \end{aligned}$$

Sin embargo, en la realidad se produce una pequeña caída de tensión en el diodo, llamada tensión de codo (V_γ), y existe una pequeña corriente de fuga, más o menos equivalente a la corriente de saturación inversa (I_S). En una primera aproximación, se puede decir que:

$$\begin{aligned} V_{IN} - V_\gamma &; \text{ si } V_{IN} > 0 \\ -I_S R_L &; \text{ si } V_{IN} < 0 \end{aligned}$$

Siendo R_L la resistencia de la Fig. 1.

En caso de que deseáramos ambas partes de la señal deberíamos utilizar un **“rectificador de onda completa”**, siendo el más sencillo el **“puente de diodos”** de la Figura 2.

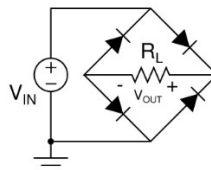


Figura 2: Puente de diodos.

En este circuito, la salida sería:

$$V_{IN} - 2.V_{\gamma} ; \text{ si } V_{IN} > 2.V_{\gamma}$$
$$- V_{IN} - 2.V_{\gamma} ; \text{ si } V_{IN} < - 2.V_{\gamma}$$

Lamentablemente, aparece una zona muerta no rectificable situada en el intervalo $- 2.V_{\gamma} < V_{IN} < 2.V_{\gamma}$ en el que la tensión de salida es aproximadamente 0 V.

Ejemplo 2 (respuesta no lineal): Rectificador de media onda de precisión o “Superdiodo”

Un rectificador de media onda de precisión es el mostrado en la Figura 3. El estudio de este circuito es sencillo. Imaginemos que la tensión aplicada en la entrada es positiva. En este caso, si la realimentación funciona correctamente, la salida del circuito, que es la entrada inversora (V_{INV}) se encontrará a la misma tensión (V_{IN}). Como la tensión es positiva, la corriente fluye a través de la resistencia tras haber recorrido el diodo.

Imaginemos ahora que la tensión aplicada fuera negativa. En este caso, si el amplificador estuviera en zona lineal, la tensión V_{OUT} sería negativa y la corriente tendría que entrar en la salida del amplificador, que actuaría como un sumidero de corriente. Sin embargo, el diodo bloquearía el paso de esta corriente. ¿Cuál es entonces la solución?. Puesto que el diodo no está en conducción ya que se llega a un absurdo, supondremos que está cortado. Sería entonces un circuito abierto, y al carecer de un camino de realimentación, el amplificador estaría en saturación. En estas circunstancias, apenas habría caída de tensión entre los extremos de la resistencia, R_L , debida simplemente a la corriente de fuga I_s , y se cumpliría que $V_{OUT} = V_{IN} = - I_s \cdot R_L$. Como $V_{N\ INV} < 0$, siendo $N\ INV$ la entrada no inversora del amplificador, éste irá a saturación negativa haciendo V_D es aprox $= - V_{SAT}$. Estas circunstancias son coherentes pues implicarían que el diodo está cortado, como se había supuesto al principio.

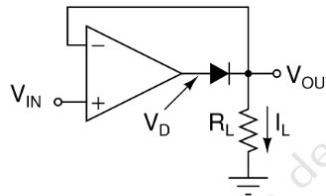


Figura 3: Rectificador de precisión de media onda o “superdiodo”.

Este circuito de rectificación de media onda, equivale a un diodo con tensión de codo V_{γ} / A . Como A es enorme, esta tensión de codo será del orden de los microvóltios. Por este motivo, la estructura anterior es conocida popularmente como “Superdiodo”.

¿Qué ocurriría si invirtiéramos los terminales del diodo?. Simplemente, la corriente entraría en el diodo si $V_{IN} < 0$ y no entraría en caso contrario. En este caso, se rechazaría la parte positiva de la señal y se mantendría la negativa, que no cambiaría de signo.

9.4.2 Funciones Lógicas

Sea un conjunto formado por sólo dos elementos que designaremos por 0 y 1. Llamaremos variables lógicas, a las que toman sólo los valores del conjunto, es decir 0 o 1.

En dicho conjunto se definen tres operaciones básicas:

SUMA LOGICA

Denominada también operación "O" (OR). Esta operación responde a la siguiente tabla:

a	b	a+b
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

PRODUCTO LOGICO:

Denominada también operación "Y" (AND). Esta operación responde a la siguiente tabla:

a	b	a*b
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

NEGACIÓN LOGICA:

Denominada también operación "N" (NOT). Esta operación responde a la siguiente tabla:

a	a'
0	1
1	0

Propiedades de el álgebra de Boole

Las propiedades del conjunto en el que se han definido las operaciones (+, *, ') son las siguientes:

PROPIEDAD CONMUTATIVA:

De la suma: $a+b = b+a$

Del producto: $a*b = b*a$

PROPIEDAD ASOCIATIVA:

De la suma: $(a+b)+c = a+(b+c) = a+b+c$

Del producto: $(a*b)*c = a*(b*c) = a*b*c$

LEYES DE IDEMPOTENCIA:

De la suma: $a+a = a$; $a+a' = 1$

Del producto: $a*a = a$; $a*a' = 0$

PROPIEDAD DISTRIBUTIVA:

De la suma respecto al producto: $a*(b+c) = (a*b) + (a*c)$

Del producto respecto a la suma: $a + (b*c) = (a+b) * (a+c)$

LEYES DE DE MORGAN:

$(a+b+c)' = a'*b'*c'$

$(a*b*c)' = a'+b'+c'$

Otras operaciones lógicas

A partir de las operaciones lógicas básicas se pueden realizar otras operaciones booleanas, las cuales son:

NAND, cuya tabla correspondiente es:

a	b	(a*b)'
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NOR, cuya tabla correspondiente es:

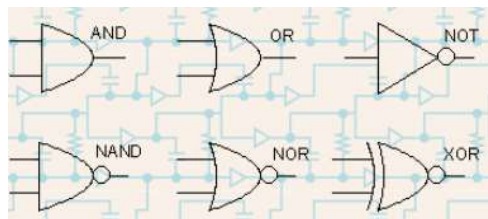
a	b	$(a+b)'$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

XOR, también llamada función OR-EXCLUSIVA. Responde a la tabla:

a	b	$a(+b)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Puertas Lógicas

Todas las funciones lógicas vistas hasta el momento poseen una representación normalizada, la cual se muestra en la figura siguiente:



Toda puerta lógica consta de 1 o más entradas; y 1 o 2 salidas (puede darse el caso de proporcionarse la salida y su negada). En todos los símbolos las entradas se encuentran a la izquierda, y las salidas a la derecha.

Estas puertas las podemos encontrar empaquetadas dentro de distintos circuitos integrados.

Las puertas lógicas más frecuentes, baratas, y fáciles de encontrar son las NAND. Debido a esto se suelen implementar circuitos digitales con el mayor número de dichas puertas.

Hay que mencionar en este punto que los niveles de tensión que se corresponden con los niveles lógicos 1 y 0; dependen de la familia lógica empleada. De momento, basta saber que la familia TTL se alimenta con +5V, por lo que los niveles de tensión se corresponderán con +5V (para el 1 lógico), y 0V (para el 0 lógico).

Funciones Lógicas

La aplicación más directa de las puertas lógicas, es la combinación entre dos o más de ellas, para formar circuitos lógicos que responden a funciones lógicas. Una función lógica, hace que una o más salidas tengan un determinado valor, para un valor determinado de las entradas.

Supongamos que tenemos dos entradas, A y B; y una salida F. Vamos a hacer que la salida sea 1 lógico, cuando A y B tengan el mismo valor; siendo 0 la salida si A y B son diferentes.

En primer lugar, veamos los valores de A y B, que hacen 1 la función:

$$A = 1 \text{ y } B = 1$$

$$A = 0 \text{ y } B = 0$$

Es decir, podemos suponer dos funciones de respuesta para cada caso:

$$F1 = A*B \text{ (A y B a 1 hacen F1 1)}$$

$$F2 = A'*B' \text{ (A y B a 0 hacen F2 1)}$$

La suma de estas funciones será la función lógica final que buscamos:

$$F = F1 + F2 = (A*B)+(A'*B')$$

A continuación, vamos a ver como en muchos casos es posible simplificar la función lógica final en otra más simple, sin alterar el funcionamiento del circuito.

Simplificación de funciones

Supongamos que tenemos un circuito donde "F" es la respuesta (salida) del mismo; en función de las señales A, B, y C (entradas):

$$F = A*B*C + A'*B*C + B*C$$

Esta función puede ser simplificable, aplicando las propiedades del álgebra de Boole. En primer lugar, aplicamos la propiedad distributiva:

$$F = B*C*(A+A') + B*C$$

Ahora, aplicamos las leyes de idempotencia:

$$F = B*C + B*C = B*C$$

Como hemos podido ver, en este ejemplo (y en muchas ocasiones), se puede simplificar la función (y por tanto el circuito); sin que ello afecte al resultado. Más adelante, veremos como simplificar funciones empleando otros métodos más sencillos y fiables.

Tabla de verdad

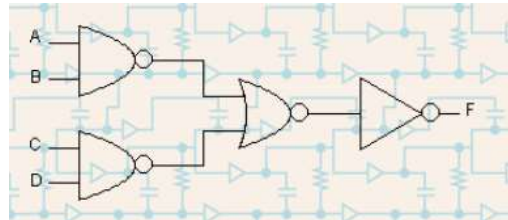
DEFINICION:

Es una forma de representación de una función en la que se indica el valor 0 o 1, para cada valor que toma ésta, por cada una de las posibles combinaciones que las variables de entrada pueden tomar.

Anteriormente, hemos visto las tablas de respuesta de cada una de las operaciones lógicas; estas tablas son tablas de verdad de sus correspondientes puertas lógicas.

La tabla de verdad, es la herramienta que debemos emplear para obtener la forma canónica de la función del circuito, para así poder simplificar y conseguir la función más óptima.

Veamos un ejemplo de un circuito, y la tabla de verdad correspondiente:



A	B	C	D	F
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	0

Como podemos ver, si simplificamos la función obtenemos:

$$F = (A*B*C*D)'$$

Es decir, una puerta NAND de 4 entradas.

9.4.3 Fundamentos tecnológicos de las familias lógicas

Familia lógica

En Ingeniería Electrónica, una familia lógica es un conjunto de circuitos integrados que implementan distintas operaciones lógicas compartiendo la tecnología de fabricación y en consecuencia, presentan características similares en sus entradas, salidas y circuitos internos. La similitud de estas características facilita la implementación de funciones lógicas complejas al permitir la directa interconexión entre los chips pertenecientes a una misma familia.

Teniendo en cuenta el tipo de transistores utilizados como elemento de conmutación, las familias lógicas pueden dividirse en dos grandes grupos: las que utilizan transistores bipolares y las que emplean transistores MOS.

La primera familia lógica en aparecer en el mercado, a principios de la década del 60, fue implementada con lógica de transistores bipolares acoplados por emisor. A fin de desarrollar circuitos de alta velocidad los transistores conducen en zona activa y de esta manera se minimiza el tiempo de conmutación entre conducción y corte. Casi inmediatamente aparecieron otras familias lógicas basadas en transistores bipolares conmutando entre corte y saturación, a fin de reproducir dentro de un chip los circuitos que hasta ese momento se realizaban utilizando componentes discretos.

La primera de estas familias fue implementada con resistencias y transistores bipolares; y se la identifica como **lógica RTL** (Resistor Transistor Logic). La integración de resistencias demanda gran cantidad de área de silicio, reduciendo la cantidad de compuertas que se podían incluir dentro de un mismo chip.

Para mejorar el aprovechamiento del área algunas resistencias de los circuitos comenzaron a ser reemplazadas por diodos, principalmente en las etapas de entrada, dando lugar a la aparición de la **lógica** de diodos y transistores identificada como **DTL** (Diode Transistor Logic).

Finalmente, los transistores multiemisor reemplazaron los diodos; y se llegó a una topología circuital que dio lugar a una familia lógica basada fundamentalmente en transistores bipolares y una mínima cantidad de resistencias. Esta familia, denominada **lógica TTL** (Transistor Transistor Logic), se popularizó rápidamente y mantiene, aún en la actualidad, su vigencia.

Con el correr del tiempo la familia TTL se convirtió en un conjunto de familias lógicas que si bien entre sí difieren en velocidad, consumo de energía y costo, mantienen características de entrada y salida compatibles; de manera que en un sistema digital pueden mezclarse componentes de distintas familias TTL.

Los principales inconvenientes de los circuitos con transistores bipolares son el alto consumo y, como consecuencia, la baja escala de integración admisible (cantidad de dispositivos posibles de integrar en un mismo chip) que se relaciona directamente con una baja complejidad del circuito.

Como alternativa para soslayar estos inconvenientes y facilitar el aumento del nivel de integración surgieron las **familias basadas en transistores de efecto de campo de compuerta aislada (MOS**, metal oxide semiconductor) de enriquecimiento. En esta tecnología, los circuitos lógicos pueden ser implementados íntegramente con transistores MOS, evitando la presencia de resistencias, en consecuencia, para implementar una función lógica dada se ocupa menor área de silicio con un proceso de fabricación más simple. Además, dado que **los transistores MOS son controlados por tensión y no permiten la circulación de corriente en sus entradas; requieren menos potencia para su funcionamiento, facilitando el aumento de la escala de integración.**

Teniendo en cuenta que los transistores MOS tienen un único tipo de portadores, y en el caso de los transistores con canal tipo N (NMOS) los portadores son electrones que tienen una movilidad considerablemente mayor que la de los huecos responsables de la conducción en los de canal P (PMOS), las primeras familias lógicas de transistores MOS se basaban en transistores de canal tipo N, siendo conocida como familia NMOS.

A fines de los setenta surgieron procesos tecnológicos que permitían integrar transistores canal N y canal P simultáneamente en una misma pastilla. De esta manera, **surge la tecnología de transistores MOS complementarios (CMOS**, complementary MOS). El conjunto de familias CMOS posee ventajas indudables sobre la TTL, y aún sobre la misma NMOS; sobre todo en cuanto al mínimo consumo de potencia haciendo que rápidamente se estableciera como el estándar dando lugar a un aumento vertiginoso de la escala de integración **hasta llegar a poner cientos de millones de transistores en un mismo chip.**

Las familias TTL no han experimentado cambios importantes en los últimos años, mientras que la permanente evolución de la tecnología CMOS puso a disposición familias CMOS capaces de reemplazar en forma directa los integrados TTL *incluso con mejor rendimiento*. Las familias TTL siguen estando presentes en el mercado si bien a partir de mediados de los ochenta los circuitos CMOS fueron ganando rápidamente el primer lugar en preferencias.

El importante y permanente desarrollo de **la tecnología CMOS llevó a la aparición de circuitos con cada vez mayor velocidad de respuesta y nivel de complejidad, imponiéndose como la preferida en el diseño de microprocesadores y microcontroladores**. En los ochenta, la sistematización del **diseño de circuitos integrados CMOS** abrió la posibilidad de implementar circuitos integrados a medida del usuario surgiendo importantes líneas de trabajo alrededor del **desarrollo de circuitos integrados de aplicación específica (ASIC, Application Specific Integrated Circuits)**; *con esta tecnología surgen y se desarrollan los dispositivos de lógica programable en campo, y procesos que permiten integrar un sistema complejo completo dentro de un único chip*.

Hoy, la tecnología CMOS ha reemplazado casi totalmente a las tecnologías basadas en transistores bipolares, no sólo en circuitos digitales sino también en circuitos analógicos.

Especificaciones genéricas de una familia lógica

Estas especificaciones son las que en general están incluidas en la hoja de datos correspondiente a cada circuito que brinda el fabricante. Dentro de ellas algunas, como ser tensión de alimentación y niveles de tensión y corriente de entrada y salida, son iguales para todos los circuitos de la familia con independencia de la función lógica que realiza cada uno de ellos, de esta manera se asegura fácil interconexión entre ellos para implementar funciones lógicas más complejas.

Hay otras características que dependen de la función que ejecuta el circuito, por ejemplo el consumo de potencia y los tiempos de retardo, propagación y conmutación, y en consecuencia sus valores y características pueden diferir de un integrante a otro.

Tensión de alimentación.

Los circuitos pertenecientes a una familia comparten el mismo rango permitido de tensiones de alimentación. Independientemente de la amplitud del rango permitido, la simplicidad y seguridad de la interconexión se mantiene si **todos los circuitos interconectados están conectados a la misma alimentación.**

Niveles de tensión y margen de ruido

El fabricante garantiza un nivel de tensión mínimo (V_{IH}), que aplicado a una entrada el circuito interpreta como un estado alto (en lógica positiva 1 lógico o "1"), y un nivel máximo de tensión (V_{IL}) que interpreta como estado bajo (en lógica positiva 0 lógico o "0").

V_{IL} : Máxima tensión de entrada que se interpreta como estado bajo

V_{IH} : Mínima tensión de entrada que se interpreta como estado alto

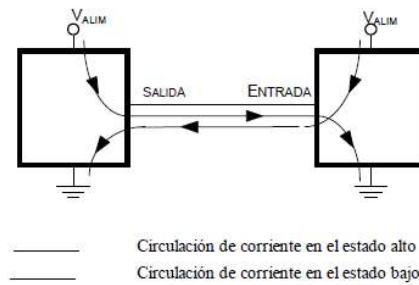
Los valores de tensión que el circuito presenta a la salida para los estados alto ("1") y bajo ("0") dependen de la familia y del estado de carga en que se encuentre dicha salida. El fabricante

garantiza entonces un entorno de valores de tensión para cada estado, siempre y cuando se respeten las restricciones establecidas para las corrientes requeridas o entregadas en la salida. Los valores que limitan estos entornos son:

V_{OL} : Máxima tensión de salida que se garantiza para el estado alto

V_{OH} : Mínima tensión de salida que se garantiza para el estado alto

Cuando la salida se encuentra en un nivel alto es el circuito lógico el que entrega potencia (corriente saliente) mientras que cuando la salida está en un nivel bajo la circulación de corriente es hacia el interior del chip.



9.5 SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

9.5.1 Convertidores Estáticos de Potencia

La Electrónica de Potencia es una de las ramas de la electrónica que más ha crecido en las décadas recientes, debido al incremento en la demanda de sistemas de este tipo por parte de los sectores de la electrónica industrial y de consumo. La electrónica de potencia encuentra aplicaciones en la conversión y el control de la potencia eléctrica en fuentes de alimentación regulada tanto de corriente continua como de corriente alterna, control de iluminación y calor, soldadura por arco eléctrico, procesos electroquímicos y metalúrgicos, filtrado activo de armónicos de redes de distribución, control de potencia reactiva, *control de máquinas de corriente continua y alterna, sistemas automotrices, y sistemas de generación y almacenamiento eléctricos*, entre otras.

El conocimiento de las estructuras básicas de los convertidores de potencia resulta imprescindible para comprender cómo funcionan los sistemas de alimentación electrónicos modernos y los accionamientos eléctricos. ***La regulación de velocidad de las máquinas eléctricas, sean estas de corriente continua, asíncronas, síncronas o especiales, como motores paso a paso, no puede desligarse en la actualidad de la electrónica de potencia.*** *La justificación de esta necesidad reside en el hecho de que, en muchos casos, la fuente primaria de energía eléctrica presenta un formato en cuanto a sus valores de amplitud, frecuencia y número de fases, que no es compatible con el requerido por la máquina, por lo que debe introducirse un elemento convertidor que realice las labores de conversión.*

Introducción

El desarrollo espectacular de la electrónica de estado sólido en los últimos años ha posibilitado la evolución de todas las ramas de la electrónica, y entre ellas la electrónica de potencia, que se ha beneficiado de la aparición de conmutadores de estado sólido que permiten reducir el volumen y prestaciones de los equipos de conversión de energía, imprescindibles en la mayoría de las aplicaciones domésticas e industriales actuales.

Como resulta conocido, el más maduro, eficiente y fiable de todos los convertidores existentes es el transformador, que presenta como inconvenientes más importantes su escasa adaptabilidad a sistemas automáticos de control, excepto en el caso del autotransformador servomotorizado, que con una velocidad de respuesta en el rango de las centenas de milisegundos (no hay que olvidar que se trata de sistemas electromecánicos) no puede competir en este aspecto con la electrónica de potencia. Lógicamente, el transformador sólo puede ser utilizado para transformar valores de tensión e intensidad alternos, *siendo incapaz de realizar transformaciones de la frecuencia.*

Desde el punto de vista electromecánico, existen también otros convertidores significativos, como el grupo Ward-Leonard, que utiliza un motor asíncrono para arrastrar un generador de corriente continua en derivación cuya salida se regula mediante una resistencia intercalada en el circuito de excitación. Existen también otros sistemas como la amplidina que pueden ser utilizados para obtener una tensión continua regulable. Sin embargo, **prácticamente todos estos sistemas han**

sido desplazados por la electrónica de potencia, que posee, en general, una mejor relación precio / prestaciones. El objetivo de esta unidad es introducir la estructura y características principales de los convertidores electrónicos de energía, indicando sus aplicaciones más comunes, *especialmente aquellas orientadas a los accionamientos eléctricos*. No hay duda de que la energía eléctrica constituye la fuente básica de energía de los sistemas electrónicos. Sin embargo, esta energía no se produce ni se consume de una forma unificada, esto es, está disponible con diferentes formatos: corriente continua, alterna en formato monofásico o trifásico, pulsada, etc. **Es necesario, por tanto, disponer de elementos de conversión que permitan transformar la energía entre los diferentes formatos, con el máximo rendimiento posible.**

Concepto de Convertidor

Un convertidor de energía es un sistema o equipo electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferentes. Por ejemplo, obtener corriente continua a partir de corriente alterna.

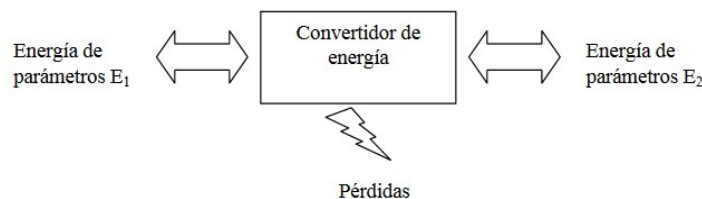


Fig. 1. Estructura básica de un convertidor electrónico de energía.

Tipos de Convertidores

Los convertidores pueden clasificarse según diferentes criterios. Uno de los criterios más comúnmente utilizados es el agruparlos según el formato de las energías de entrada y salida. Básicamente y según este criterio, pueden establecerse cuatro grandes grupos:

- **Convertidores ca/cc o rectificadores.** Este tipo de convertidores transforman corriente alterna, monofásica o trifásica, en continua. Desde el punto de vista de los accionamientos, presentan una importancia fundamental, ya que se utilizan de forma general en las máquinas siguientes:
 - **Máquina de corriente continua.** Alimentación tanto del circuito de excitación como del inducido.
 - **Máquina asíncrona.** El control, tanto escalar como vectorial de velocidad en la máquina asíncrona se realiza mediante algún tipo de convertidor cc/ca que necesita como fuente de alimentación una tensión continua. Otra aplicación de este tipo de convertidores es el frenado de los motores asíncronos.
 - **Máquina síncrona.** La utilización de los convertidores ca/cc en la máquina síncrona se dirigen a dos grandes grupos de aplicación. En el caso de los generadores síncronos, es necesario contar con una corriente continua para la excitación de la máquina. Desde el punto de vista de su utilización como motor, es necesario contar con un convertidor ca/cc para el control de la excitación, y en aquellos casos en que se realice un control de velocidad de la máquina, será necesario contar con una etapa rectificadora como paso previo para atacar el convertidor cc/ca que alimentará la máquina a tensión y

frecuencia variables. Destacar asimismo el campo de los generadores síncronos de pequeña y media potencia que funcionan en un régimen de velocidad muy variable, como pueden ser los generadores eólicos. En este tipo de aplicaciones es común utilizar un convertidor ca/cc para transformar la energía generada en continua como paso previo a la transformador cc/ca de la misma para su acoplamiento a un sistema eléctrico de frecuencia y tensión fijas.

- **Motores especiales.** Algunas máquinas como los motores paso a paso necesitan una fuente de corriente continua que debe conmutarse adecuadamente para conseguir su control. Lo mismo sucede con algunas máquinas de tipo brushless (sin escobillas) que requieren una fuente de corriente continua como paso previo para alimentar un convertidor cc/ca.
- **Convertidores cc/cc.** Este tipo de convertidores transforman un determinado valor de corriente continua de entrada en uno distinto de salida, con la posibilidad de incluir, además, aislamiento galvánico entre entrada y salida. Desde el punto de vista de los accionamiento su campo de aplicación es el mismo que el de los convertidores ca/cc, con la diferencia de que la fuente de energía no es alterna, sino continua. Su utilización se restringe a sistemas embarcados, donde la distribución de energía se realiza en corriente continua, o en algunas situaciones especiales, su utilización combinada con los rectificadores no controlados permite diseñar convertidores ca/cc con un mejor factor de potencia.
- **Convertidores cc/ca.** Este tipo de convertidores reciben también el nombre de inversores. Básicamente, realizan una conversión de corriente continua en corriente alterna, con la posibilidad de poder controlar tanto la frecuencia como el valor eficaz de la tensión o intensidad de salida, lo que les hace fundamentales para el diseño de accionamientos basados en máquinas asíncronas y síncronas. Dado que normalmente la distribución de energía se realiza en corriente alterna, suelen ir asociados a un rectificador. *Se utilizan también para acoplar al sistema eléctrico la energía generada por los generadores eólicos, que se caracterizan por un motor primario de velocidad muy variable.*
- **Convertidores ca/ca.** Este tipo de convertidores se utilizan ampliamente en el diseño de arrancadores suaves para reducir la intensidad demandada durante el arranque de los motores de inducción. En su estructura de control más básica, su función es modificar el valor eficaz de la tensión de entrada, conservando su frecuencia, aunque también puede conseguir un tensión de salida con una frecuencia submúltiplo de la de entrada. En este último caso reciben el nombre específico de **cicloconvertidores**, habiendo obtenido durante la última década un especial protagonismo en el **diseño de sistemas de tracción eléctrica**.

Semiconductores de Potencia

El desarrollo de los convertidores electrónicos de potencia está ligado al desarrollo de los *dispositivos de estado sólido* con que se construyen. A pesar de que la historia de la electrónica de potencia comenzó hacia el año 1900 con el desarrollo del rectificador de arco de mercurio, no fue hasta la década de los años cincuenta cuando comienza un desarrollo espectacular motivado por la **invención del transistor de silicio**. A partir de este hito fundamental, se producen otros de gran importancia como el desarrollo del **tiristor** o **rectificador controlado de silicio (SCR)** en 1956. A partir de esta década, la electrónica de potencia va a estar dominada casi exclusivamente por la electrónica de estado sólido. A pesar de que hoy en día existe una gran variedad de tecnologías de

conmutación de potencia para la fabricación de convertidores, todas ellas persiguen el mismo objetivo, que puede resumirse en las características que presenta un elemento ideal.

Elemento ideal

Como se ha visto al principio del tema, la idea básica de un convertidor de potencia es transformar el flujo de energía entre su entrada y salida. Para poder realizar dicha transformación, es necesario contar con ***interruptores controlados***, que tengan las siguientes características:

- $R(\text{off}) = \infty$. Presenta una resistencia infinita entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de bloqueo (o corte).
- $R(\text{on}) = 0$. Presenta una resistencia nula entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de conducción (o saturación).
- $t_{\text{off} \rightarrow \text{on}} = 0$. El tiempo para la conmutación, del estado de bloqueo al estado de conducción es nulo.
- $t_{\text{on} \rightarrow \text{off}} = 0$. El tiempo para la conmutación, del estado de conducción al estado de bloqueo es nulo.
- $V_{\text{off, max}} = \infty$. Soporta una tensión infinita entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de bloqueo.
- $I_{\text{on, max}} = \infty$. Soporta una corriente de paso infinita cuando se encuentra en el estado de conducción.
- $P_{\text{control}} = 0$. La potencia consumida por el circuito de control es nula.

Desde un punto de vista circuital, el elemento ideal se caracteriza por un **interruptor controlado**, tal como muestra la figura. Como puede observarse, ***presenta tres terminales: dos terminales de conexión y un tercero de control***.

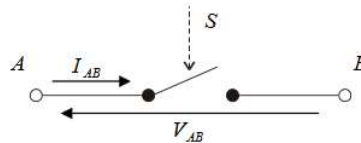


Fig. 3. Esquema eléctrico de un elemento de conmutación ideal.

Eléctricamente, los **dispositivos se caracterizan por una curva que relaciona la intensidad de conducción con la tensión entre terminales de conexión**. Tal como se han definido los terminales en la figura anterior, las curvas v-i del elemento ideal para los dos estados de conducción son las que se muestran a continuación, donde se ha considerado como positiva la circulación de la intensidad en el sentido AB. Se considera positiva la tensión AB.

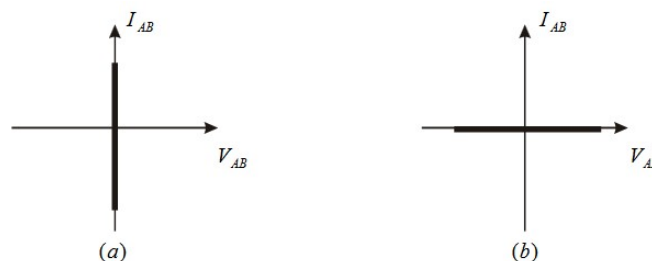


Fig. 4. Curvas v-i de un elemento ideal. (a) Estado de conducción; (b) Estado de bloqueo.

Las características descritas corresponden a un **elemento ideal, inexistente en la práctica**. Las soluciones comerciales existentes se aproximan en mayor o menor medida a estas características, sin llegar a cumplirlas de forma completa. En la figura 5 se **comparan la intensidad máxima de conducción y las tensiones máximas de bloqueo soportadas por los diferentes tipos de semiconductores utilizados habitualmente**.

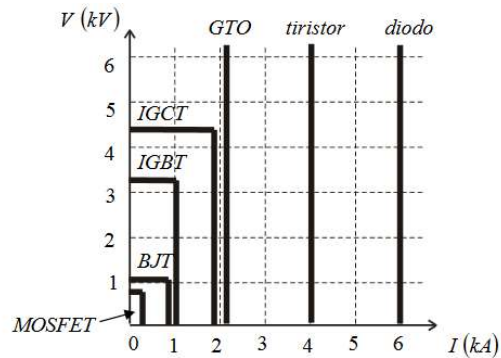


Fig. 5. Curva comparativa de la capacidad v-i (en valores medios) de diferentes tecnologías de dispositivos.

Tiristor

Los tiristores son dispositivos semiconductores fabricados mediante la unión de cuatro capas con una estructura **pnpn** que presenta, por tanto, **tres uniones pn**.

Posee tres terminales: **ánodo, cátodo y puerta**.

El tiristor es el semiconductor de potencia más robusto y fiable, ya que, a diferencia del transistor, puede soportar elevadas sobreintensidades durante tiempos reducidos. La principal ventaja del tiristor es que soporta grandes tensiones e intensidades (hasta 5.000 V y 5.000 A). Tiene una caída de tensión directa baja (entre 1 y 3 V), por lo que las pérdidas de conducción son reducidas. **Su frecuencia de operación está limitada a 1 kHz.**

Desde un punto de vista funcional, el tiristor se comporta como un diodo cuando se aplica una corriente de puerta por el terminal G.

El proceso de activación requiere que se cumplan dos condiciones:

- 1- **Debe aplicarse una intensidad de control en el terminal de puerta (G).**
En los dispositivos comerciales, dicha intensidad debe tener unas condiciones de **amplitud y duración determinadas**.
- 2- **En el momento de aplicar la intensidad de control en el terminal de puerta (G), la intensidad ánodo-cátodo debe ser positiva.**

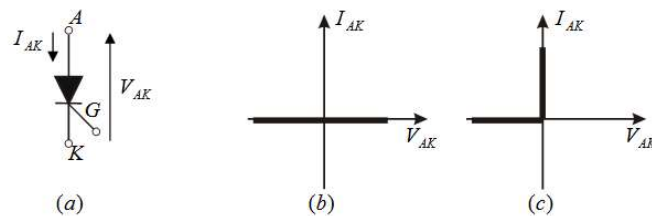


Figura 6. Símbolo y curvas v-i de un tiristor ideal. (b) estado de bloqueo; (c) Estado de conducción.

Una vez que se ha activado y pasa a la condición de conducción, permanece en dicho estado hasta que la intensidad ánodo-cátodo se hace negativa. Este hecho, hace que si la intensidad ánodo-cátodo es de tipo alterno, el tiristor conmutará automáticamente del estado de conducción al de bloqueo *cada vez que dicha intensidad cambie de signo*. Comparándolo con el modelo de elemento ideal, **el tiristor presenta un gran avance con respecto al diodo**, ya que **permite un control externo de activación**.

Sin embargo, se desactiva automáticamente en las mismas condiciones en las que un diodo pasa al estado de bloqueo. **Además, una vez que ha conmutado al estado de bloqueo, permanece en él hasta que se aplica de nuevo una intensidad de puerta.**

9.5.2 Rectificador de Potencia

Los convertidores ca/cc, denominados también **rectificadores**, son aquellos equipos o sistemas electrónicos dedicados a convertir una tensión alterna sinusoidal de frecuencia y amplitud constante en una tensión continua de salida.

La estructura básica de este tipo de convertidores se muestra en la figura 7, donde se representan también las formas de onda ideales de entrada y salida.

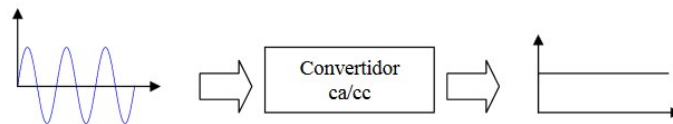


Figura 7. Estructura funcional básica de un convertidor ca/cc.

Aunque el objetivo de este tipo de convertidor es transformar la tensión alterna de entrada en continua, deben tenerse en cuenta otros aspectos laterales al problema que son importantes para poder seleccionar y utilizar correctamente estos equipos. En primer lugar debe considerarse el **rendimiento del convertidor**, que no es más que una medida de las pérdidas generadas internamente durante el proceso de conversión.

Sin embargo, a pesar de que el rendimiento tiene una gran importancia en una adecuada selección y utilización de los rectificadores, **es necesario considerar otros aspectos**. En la práctica, la tensión de salida de un convertidor ca/cc **no es totalmente continua**, existiendo en mayor o menor medida una componente de rizado que distorsiona esta tensión continua.

Concepto de Cuadrante

El concepto de cuadrantes de funcionamiento de un convertidor **hace referencia a la capacidad del mismo para ceder y absorber energía**. Se trata de un aspecto muy importante en el diseño de los accionamientos, ya que aunque un motor realiza una transformación de energía eléctrica en mecánica, absorbiendo energía del convertidor, es posible que durante las maniobras de frenado se comporte como un generador, por lo que **es necesario que el convertidor sea bidireccional, transformando energía desde y hacia la red**. En la figura 8, se muestra un convertidor junto con una representación de los cuadrantes de funcionamiento.

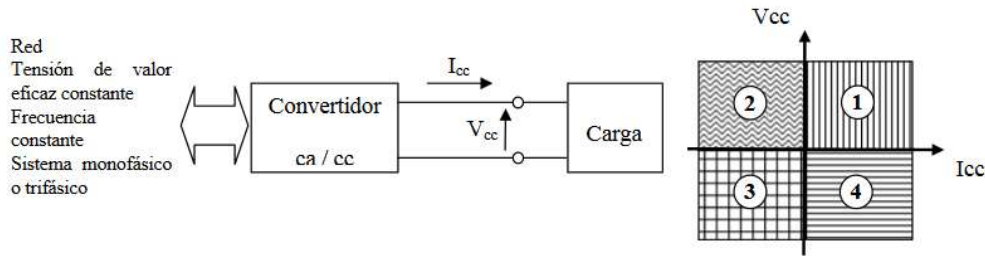


Figura 8. Representación del concepto de cuadrante.

Si el convertidor de la figura es capaz de generar una tensión V_{cc} e intensidad I_{cc} , se definen los cuadrantes de funcionamiento según los signos de V_{cc} e I_{cc} :

- **Cuadrante 1.** $V_{cc} > 0, I_{cc} > 0$. Esta condición establece que el flujo de energía se produce desde el convertidor hacia la máquina. Dado que tanto la tensión como la intensidad sólo pueden tener signo positivo, no es posible utilizar este convertidor en un flujo bidireccional de energía desde la máquina hacia la red.
- **Cuadrante 2.** $V_{cc} > 0, I_{cc} < 0$. Esta condición establece que el flujo de energía se produce desde la máquina hacia el convertidor. De forma similar a lo que ocurre con el primer cuadrante, un convertidor que sólo opere en el segundo, sólo podrá ser utilizado para conectar un generador a la red.
- **Cuadrante 3.** $V_{cc} < 0, I_{cc} < 0$. Esta condición es similar a la que se establece en el primer cuadrante, con la diferencia de que al invertir el signo de la tensión e intensidad, se invierte también el sentido de giro del motor.
- **Cuadrante 4.** $V_{cc} < 0, I_{cc} > 0$. Esta condición es similar a la que se establece en el segundo cuadrante, con la diferencia de que la máquina gira en sentido opuesto.

Los convertidores ca/cc presentan diferentes topologías en función de las características de las tensiones de entrada y salida. Si la tensión alterna de entrada tiene una frecuencia y valor eficaz constante, y se pretende conseguir una tensión continua de salida también constante, es posible recurrir a **rectificadores estáticos no controlados**. Si por el contrario, la salida tiene un valor eficaz variable, o debe ser ajustada a diferentes valores, el rectificador debe presentar algún tipo de control. Básicamente, los rectificadores se clasifican según el rango de potencias en:

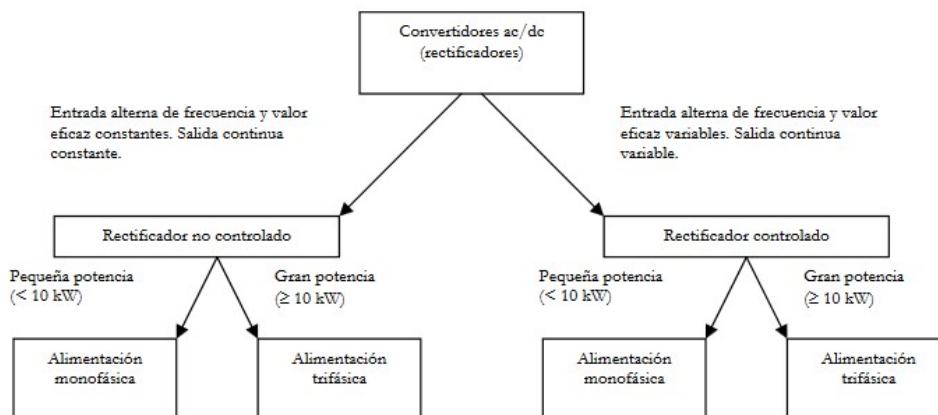


Figura 9. Estructura básica de los rectificadores en función del tipo de entrada y salida, y potencia de conversión.

Algunas Configuraciones de Rectificadores no controlados (ejemplo utilizando diodos)

A- Puente simple de media onda (utilizando diodos)

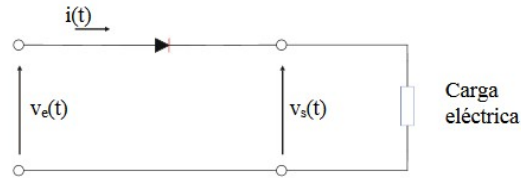


Figura 10. Rectificador monofásico de media onda, alimentando una carga resistiva.

B- Puente simple sobre un transformador con toma intermedia de onda completa (utilizando diodos)

Una forma de reducir la componente ondulatoria de la tensión continua de salida del puente simple, es añadir un segundo diodo y conectar el conjunto a un transformador con toma intermedia, tal como se muestra en la figura 11. Del circuito de la figura 11, se observa que el diodo D1 conduce durante el semiciclo positivo de la tensión V_1 ; mientras que el diodo D2 lo hace durante el semiciclo negativo. En la figura 12, se muestran las tensiones de entrada y salida.

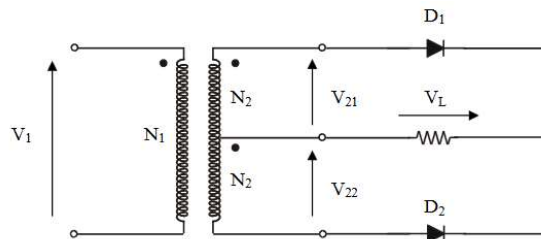


Figura 11. Esquema eléctrico de un rectificador de onda completa de dos diodos y transformador de toma central.

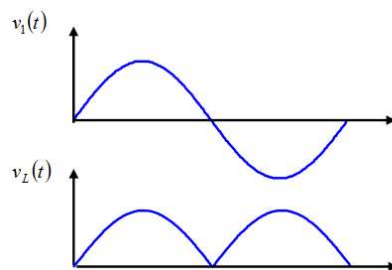


Figura 12. Formas de onda a la entrada/salida del convertidor.

C- Rectificador monofásico - puente de onda completa (utilizando diodos)

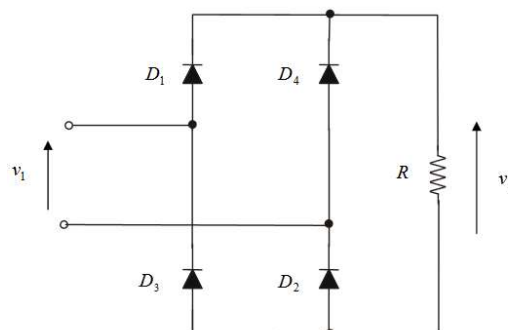


Figura 13. Rectificador monofásico de onda completa.

Algunas Configuraciones de Rectificadores controlados (ejemplo utilizando tiristores)

Los rectificadores no controlados se caracterizan por tener una relación rígida entre la salida y la entrada. Esta rigidez puede ser superada utilizando a la entrada un transformador con tomas o un autotransformador regulable, de forma que controlando el valor eficaz de la entrada se consigue controlar también el valor eficaz de la salida. **Sin embargo, la utilización de un transformador o un autotransformador supone un incremento sustancial en el tamaño, volumen y peso del convertidor. Además, la incorporación de elementos electromecánicos, sujetos a desgaste, incrementa el mantenimiento a la par que reduce la velocidad de variación de la salida.**

Una posible solución al problema anterior, consiste en utilizar semiconductores con algún grado de control en el proceso de conmutación.

A continuación, se presentan algunas soluciones basadas en tiristores.

A- Puente simple de media onda (utilizando tiristores)

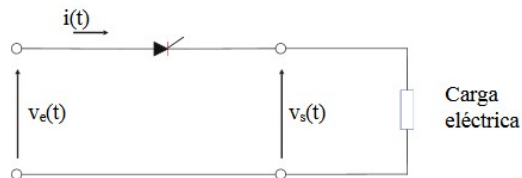


Figura 14. Rectificador monofásico de media onda, alimentando una carga resistiva.

En la figura 15, se muestran las tensiones de entrada y salida del convertidor, para un ángulo de 90°; y suponiendo una carga resistiva.

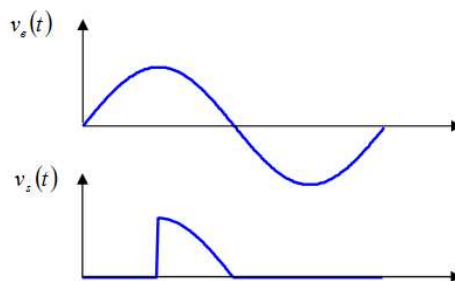


Figura 15. Forma de onda de las tensiones de entrada y salida del rectificador.

B- Rectificador monofásico - puente de onda completa (utilizando tiristores)

Al igual que se hizo con el rectificador controlado de media onda, un método adecuado para controlar la salida de un rectificador de onda completa consiste en sustituir los diodos por tiristores. De esta forma, el valor de continua de la salida se ajusta variando el ángulo de encendido. En la figura 16 se muestra un rectificador controlado de onda completa con topología de puente.

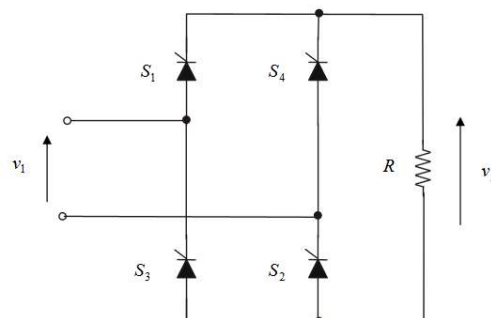


Figura 16. Rectificador monofásico de onda completa.

Totalmente controlado (mediante tiristores).

Al igual que ocurría con el rectificador de onda completa no controlado, los tiristores S1 y S2 conducen durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada, **pero sólo a partir del momento en que se aplique una señal de control a sus terminales de puerta**. De la misma forma, S3 y S4 conducirán durante el semiciclo negativo de la tensión de entrada, **pero sólo a partir del momento en que se aplique una señal de control a sus terminales de puerta**.

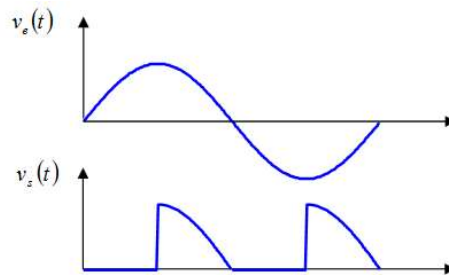


Figura 17. Forma de onda de las tensiones de entrada y salida del rectificador.

9.5.3 Convertidores cc/ca. Inversores.

Se entiende por convertidor cc/ca o inversor aquel circuito que es capaz de *transformar una corriente continua en alterna*. La utilidad de este tipo de circuitos es variada. **Puede pensarse en la alimentación de equipos informáticos, médicos, de comunicaciones o electrónicos en general, a partir de una fuente de alimentación de corriente continua**. Este sería el caso típico de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) que proporciona una salida alterna a partir de baterías cuando falla la alimentación. Este no es, sin embargo, el único caso en el que los convertidores cc/ca son importantes. **Las máquinas asíncronas giran a una velocidad próxima a la de sincronismo, que es proporcional a la frecuencia de la tensión de alimentación. Por tanto, variando ésta, es posible regular la velocidad del accionamiento**. Estas aplicaciones podían encabezar una lista en la que se incluirían también fuentes de alimentación cc/cc con aislamiento galvánico, etc.

Desde un punto de vista general, los inversores suelen clasificarse en dos grandes grupos:

- **Convertidor de onda cuadrada.**
- **Convertidor PWM.**

Inversor de Onda Cuadrada

El inversor de onda cuadrada se basa en el funcionamiento alternado de los interruptores del circuito mostrado en la figura 18.

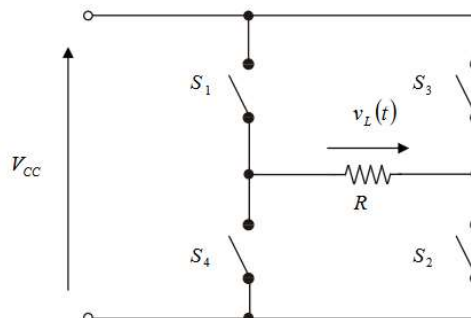


Figura 18. Estructura básica de un inversor en puente 1f.

A partir de la tensión de alimentación continua V_{cc} es posible obtener una tensión alterna en la carga abriendo y cerrando los interruptores en una secuencia determinada.

En la tabla siguiente se muestra el estado de los interruptores y la tensión en la carga.

S1	S2	S3	S4	$v_L(t)$
Off	Off	Off	Off	0
On	On	Off	Off	$-V_{cc}$
Off	Off	On	On	V_{cc}

En la figura 19, se muestra la tensión en la carga en función del estado de los interruptores.

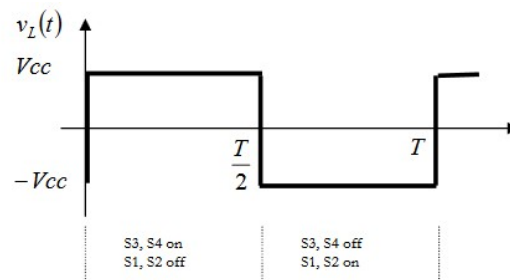


Figura 19. Forma de onda de salida de un inversor de onda cuadrada.

Si las conmutaciones se realizan de forma periódica, se produce una alternancia de valores V_{cc} , $-V_{cc}$ que da lugar a una tensión alterna de valor V_{cc} (voltios eficaces). Como el lector intuye, la tensión de salida contiene, además de la componente fundamental, armónicos impares.

La magnitud de dichos armónicos puede obtenerse mediante el análisis de Fourier.

Como referencia para el lector, los armónicos que aparecen tienen un orden impar y magnitud $1/h$ siendo n el orden armónico.

Inversor PWM

La novedad de este tipo de inversores reside en la estrategia de control de los interruptores del puente (control de los tiristores). La modulación de anchura de pulsos (o modulación por ancho de pulsos = PWM), es un método de control que permite reducir la tasa de distorsión armónica, especialmente si se compara con el inversor de onda cuadrada.

Las ventajas comparativas de este tipo de control, frente al de onda cuadrada son:

- Menor THD (Distorsiones Armónicas Totales).
- Reducción de los requerimientos del filtro necesario para reducir los armónicos.
- Control de la amplitud de salida.

Como ocurre siempre en ingeniería, las soluciones llevan siempre asociados algunos inconvenientes, los cuales son:

- Circuitos de control más complejos.
- Pérdidas más elevadas en el inversor, debido al incremento en la frecuencia de conmutación.

El control de los interruptores se realiza comparando una señal de referencia denominada **señal moduladora** que en el caso más simple es una senoide y una **señal portadora**, que en el caso más simple es una señal triangular que controla la frecuencia de conmutación. En la figura 20 se muestran las señales moduladora y portadora así como la **forma de onda de la tensión de salida**. En este tipo de modulación, el estado de los interruptores se obtiene a partir de la comparación entre una señal de referencia, en este caso sinusoidal y una señal portadora, en este caso triangular. **Durante el semiciclo positivo, los interruptores 3 y 4 se activan cuando la señal de referencia es mayor que la portadora. En el caso del semiciclo negativo, se activan los interruptores 1 y 2 cuando la señal de referencia es mayor que la portadora, ambas expresadas en valor absoluto.**

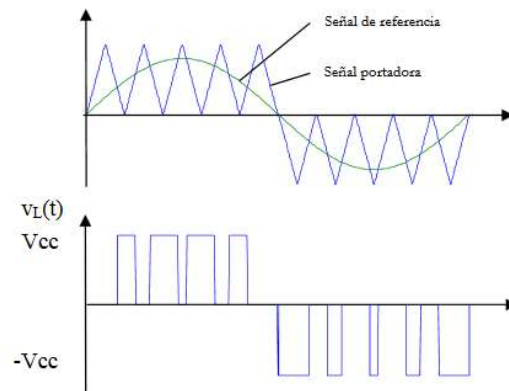


Figura 20. Modulación PWM unipolar construida mediante una señal de referencia sinusoidal y una portadora triangular.

La modulación por ancho o de pulso (o en inglés pulse width modulation PWM) es un tipo de **señal de tensión, utilizada para enviar información o para modificar la cantidad de energía que se envía a una carga**. Este tipo de señales son de tipo cuadrada o sinusoidales en las cuales **se les cambia el ancho relativo respecto al período de la misma, el resultado de este cambio es llamado ciclo de trabajo y sus unidades están representadas en términos de porcentaje**.

En aplicaciones del motor de inducción donde se requieren velocidades variables, **la fuente de potencia debe suministrar tensiones con amplitud y frecuencia variables**; la solución más común para el accionamiento del motor es el **uso de inversores**.

Los inversores se ubican en la **electrónica de potencia en el campo de la conversión de energía eléctrica, y tienen como función principal el generar una señal sinusoidal con amplitud y/o frecuencia variable a partir de fuentes DC**. De acuerdo a su fuente de alimentación, los inversores se clasifican en: inversores con fuente de corriente (CSI) e inversores con fuente de tensión (VSI). Dentro de estos dos grupos existen varias configuraciones, sin embargo, para el caso de los accionamientos eléctricos de baja y mediana potencia, **la topología típica es el inversor trifásico de dos niveles en puente completo (Figura 21)**. Este esquema, está formado por un conjunto de **seis transistores de potencia, con 6 diodos en anti paralelo alimentados por una fuente de tensión DC**.

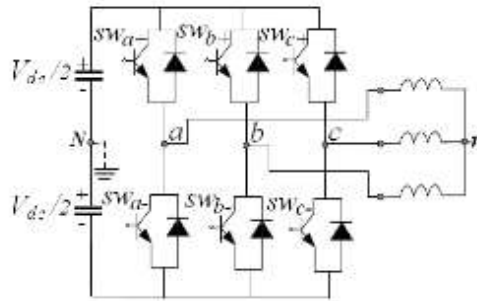


Figura 21. Inversor Trifásico VSI de dos niveles en puente completo.

Cada par transistor-diodo, opera en los estados de corte o saturación comportándose como un interruptor bidireccional. A partir del estado de los interruptores, los terminales de salida de cada rama, toman los valores de tensión ($V_{dc} / 2$) o ($- V_{dc} / 2$) con respecto al terminal central de fuente de DC N (ver punto N, en la Figura 21). La secuencia de conmutación que siguen los interruptores viene impuesta por un proceso previo de modulación que será el que determine las características de la señal de salida, entre ellas: **forma, amplitud, frecuencia y contenido armónico.**

Actualmente **existe gran variedad de técnicas de modulación utilizadas en el control de inversores trifásicos; una técnica empleada que deriva sus bases del área de las telecomunicaciones es la modulación por ancho de pulso (PWM).** Dentro de esta técnica, se han propuesto diversos **algoritmos de modulación**, cada uno pretendiendo mejorar alguna característica dentro del proceso, por ejemplo: las pérdidas por conmutación, la eficiencia de la conversión o el contenido armónico presente en la onda de salida. **En los accionamientos eléctricos, esta última característica es de gran importancia debido a la cantidad de efectos indeseables que provocan las señales armónicas al atravesar los devanados del motor; entre ellos se destacan: distorsiones en la onda sinusoidal, reducciones del factor de potencia, incremento de las pérdidas en la máquina, sobrecalentamientos, vibraciones, reducción del par útil de la máquina y de la vida útil del motor.**

El contenido armónico en la operación del inversor, puede ser mejorado significativamente **realizando una modulación en función de una señal sinusoidal**; y propone el algoritmo de modulación PWM sinusoidal (SPWM-sinusoidal PWM); a partir de entonces, se inicia el **desarrollo de los algoritmos PWM modernos.**

Las técnicas de modulación PWM se basan en el principio de balance tensión-segundo. Según este principio, **el ciclo de trabajo del tren de pulsos generado está determinado por la tensión con amplitud y frecuencia deseada a la salida del inversor.**

Existen dos enfoques para la implementación de la modulación PWM:

- Modulación PWM basada en portadora (CB-PWM).
- Modulación PWM basada en vectores espaciales (SV-PWM).

Para ilustrar el principio de funcionamiento de la técnica PWM basada en portadora obsérvese el diagrama de la Figura 22, que corresponde a la fase a del inversor trifásico.

En la Figura, **las señales de activación de los interruptores superior e inferior, S_a y \bar{S}_a respectivamente, se obtienen mediante la comparación entre las amplitudes de una señal de alta frecuencia denominada portadora y una señal de baja frecuencia denominada moduladora o de referencia.**

Para el cálculo de las señales S_a y \bar{S}_a es suficiente un único proceso de comparación puesto que estas son complementarias. **Al considerar el inversor trifásico, son necesarios 3 procesos de comparación simultáneos, uno para cada fase** como se muestra en la Figura 23.

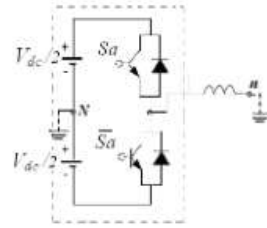


Figura 22. Fase a de un inversor trifásico VSI de dos niveles en puente completo

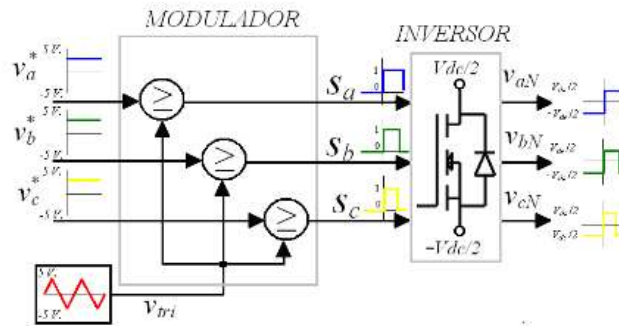


Figura 23. Esquema de modulación trifásico PWM basado en portadora (diagrama de bloques).

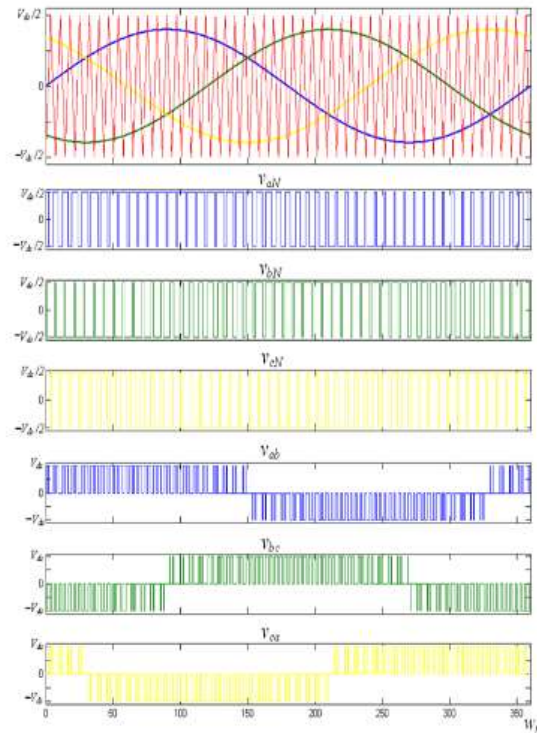


Figura 24. Proceso de Modulación SPWM trifásico.

9.5.4 CICLOCONVERTIDORES O CONVERTIDORES CA/CA.

Los convertidores ca/ca permiten realizar, en términos generales, la conversión de corriente alterna en corriente alterna. **En la práctica, esta transformación se reduce a una reducción del valor eficaz de la tensión de entrada, y en algunos casos, a una reducción de la frecuencia de entrada que puede tomar únicamente algunos valores.** Desde el punto de vista práctico, este tipo de convertidores se utilizan habitualmente en la **construcción de arrancadores suaves para motores asíncronos, reguladores de luz, reguladores de temperatura de calderas y calentadores y otras aplicaciones industriales.** En la figura 25 se muestra el circuito eléctrico básico de un convertidor ca/ca monofásico. **Como puede observarse, el circuito está formado por dos tiristores conectados en antiparalelo.**

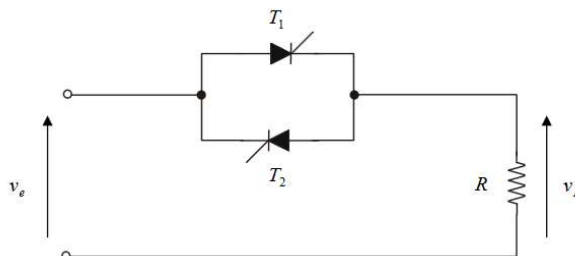


Figura 25. Circuito básico de un convertidor ca/ca monofásico.

Como resulta lógico, el control de la tensión de salida se realiza mediante los ángulos de encendido de los tiristores T_1 y T_2 . Dicho control puede ser realizado de dos formas básicas:

- Control todo/nada. Basado en la activación y desactivación de la salida durante unos ciclos de forma completa.
- Control de fase. **Basado en recortar la señal de entrada para reducir su valor eficaz.**

A continuación, se revisan estos dos tipos de control.

Control todo/nada

Este tipo de control se basa en la activación/desactivación periódica de los tiristores para conseguir que la salida sea activa durante n ciclos y esté desconectada durante otros m . De esta forma, **el efecto global que se consigue es una reducción del valor eficaz.** En la figura 26 se muestra las formas de onda de salida en este tipo de control.

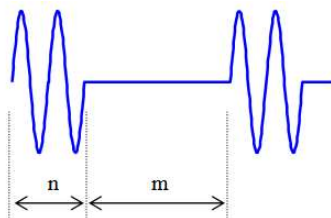


Figura 26. Forma de onda de la tensión de salida de un convertidor ca/ca con control todo/nada.

Se observa de esta forma cómo es posible utilizar este convertidor para reducir el valor eficaz de la tensión de entrada. Este método no es aplicable, sin embargo, a cualquier tipo de aplicación.

Un equipo electrónico no puede, en general, estar sin alimentación durante m ciclos, ya que es posible que los circuitos digitales sufran un reset. Normalmente, este tipo de control se utiliza en la gestión de resistencias de calentamiento, dado que la inercia térmica del conjunto es muy superior al ritmo de variación eléctrico.

Control de fase

El control de fase resulta similar al realizado en el caso del rectificador de media onda controlado. La diferencia radica únicamente en la topología simétrica de este tipo de convertidor. Así, en la figura 27 se muestra la forma de onda de la tensión de salida. **A partir del ángulo α de encendido es posible controlar el valor eficaz de salida.**

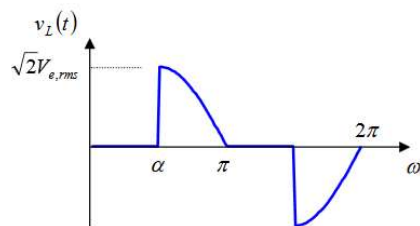
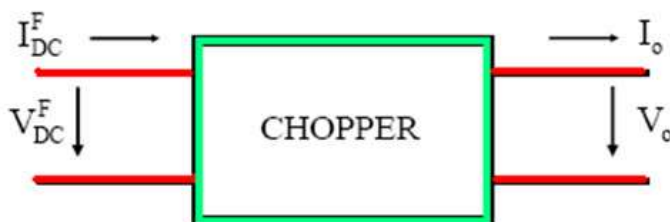
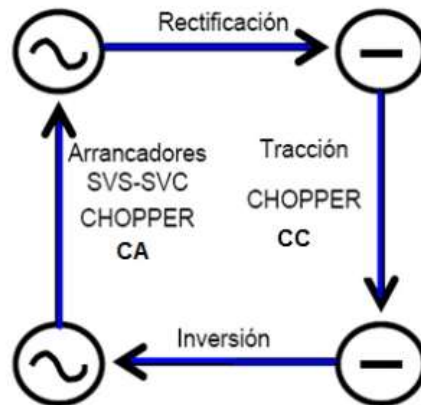


Figura 27. Forma de onda de la tensión de salida de un convertidor ca/ca con control de fase.

9.5.5 CHOPPERS

9.5.5.1 Convertidores electrónicos (cc/cc)

- **Controladores CA/CC**
 - Rectificadores de potencia.
 - Variadores de velocidad de MCC.
- **Convertidores CC/CC**
 - Troceadores (Choppers).
 - Variadores de velocidad de MCC.
 - Tracción eléctrica.
- **Controladores CA/CA**
 - Arrancadores suaves.
 - Compensadores estáticos (SVS, SVC).
- **Convertidores CC/CA**
 - Inversores (onduladores).
 - Variadores de velocidad.



$$\eta \cong 1$$

$$P_{DC}^F \approx P_o$$

$$V_{DC}^F \cdot I_{DC}^F \approx V_o \cdot I_o$$

Permite variar y controlar el valor medio de la tensión continua (V_o) con la que alimentamos una carga, mediante una entrada de tensión continua constante o variable (VDC).

Pueden trabajar en los 4 cuadrantes (V_o , I_o); lo más frecuente es que trabajen en el cuadrante I, o bien en los cuadrantes I y II.

Se construye con interruptores estáticos (GTO's, IGBT's, transistores) y diodos de potencia.

Es un equipo que puede manejar altas potencias y de gran rendimiento.

Ventajas y desventajas de los Choppers

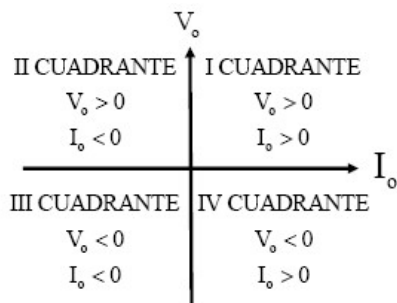
Ventajas

- Regulación continua de la tensión (aceleración-frenado suave).
- Regulación de la velocidad con menores pérdidas.
- Posibilidad de regeneración.
- Control prácticamente constante.
- Fácil mantenimiento.

Desventajas

- Necesidad de filtros (de continua).
- Personal especializado para el mantenimiento - control.
- Costos (especialmente de los filtros y en particular los condensadores de filtros).

Tipos de Choppers y cuadrantes de funcionamiento



- CHOPPER DIRECTO O REDUCTOR (funciona en el I cuadrante)
- CHOPPER INVERSO O ELEVADOR (funciona en el II cuadrante), es capaz de invertir la corriente.
- CHOPPER DE DOS Y CUATRO Cuadrantes

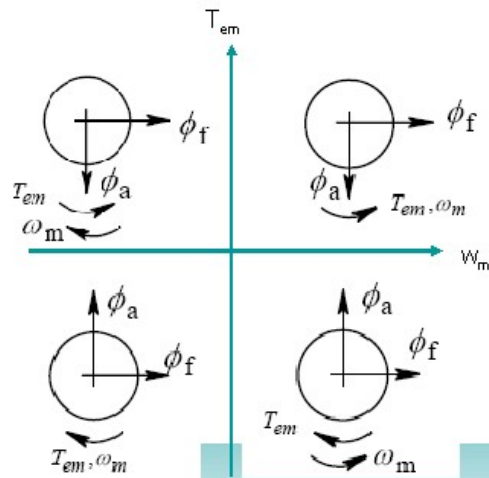
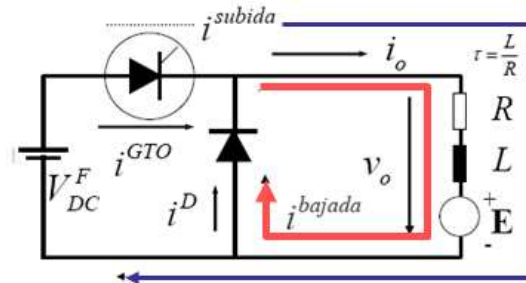
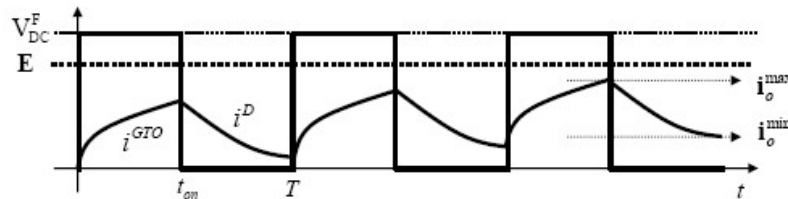


Figura 28. Máquinas de CC – pueden operar en los 4 cuadrantes.

Chopper directo (forward)



- Inicialmente, sin corriente de carga, si $V^F > E$ el GTO está polarizado positivo y puede ser disparado. En ese instante se establece una corriente i^{subida} como se indica en la figura.
- La tensión de la fuente aparece sobre el diodo y lo polariza en inverso, por lo que permanece abierto.



Formas de control

- A- t_{on} variable y T fijo \rightarrow **modulación por ancho de pulso (PWM)**.
- B- t_{on} fijo y T variable \rightarrow **modulación en frecuencia**.
- C- t_{on} y T variables \rightarrow **modulación en frecuencia y pulso**.

9.5.5.2 Convertidores electrónicos (ca/ca)

Veremos en este punto, dos ejemplos:

- Convertidor (**mediante tiristores**) monofásico de corriente alterna (controlado).
- Convertidor (**mediante tiristores**) trifásico de corriente alterna (controlado).

Controladores Monofásicos de corriente alterna AC (de fase controlada)

El circuito de potencia de base de una corriente alterna monofásica de tensión ca (controlador), como se muestra en la figura 29, se compone de un par de SCRs conectados espalda con espalda (también conocido como inversa – paralelo, o anti paralelos) **entre el suministro de corriente alterna y la carga**.

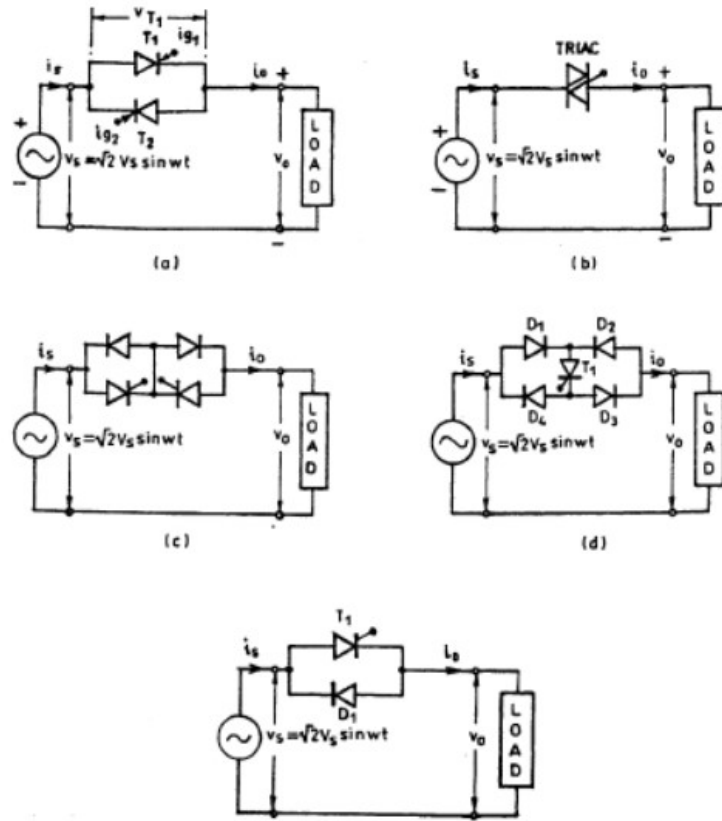


Figura 29. Controlador monofásico de tensión de ca: (a) de onda completa, 2 SCR en paralelo inverso; (b) de onda completa con Triac; (c) de onda completa con 2 SCR y 2 diodos; (d) de onda completa con 4 diodos y 1 SCR; (e) de onda completa con 1 SCR y 1 diodo antiparalelo

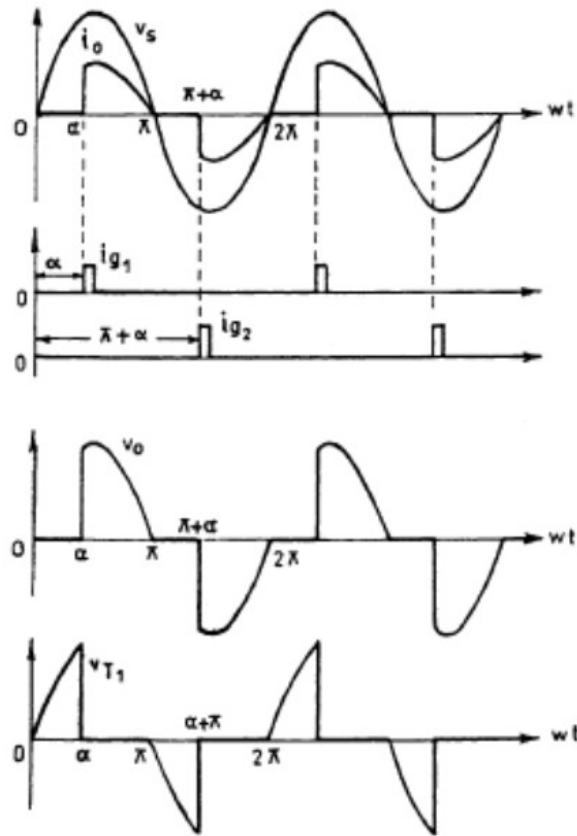


Figura 30. Formas de onda de ca 1f. de onda completa del controlador de tensión con carga (R).

Controladores Trifásicos de corriente alterna AC (de fases controladas)

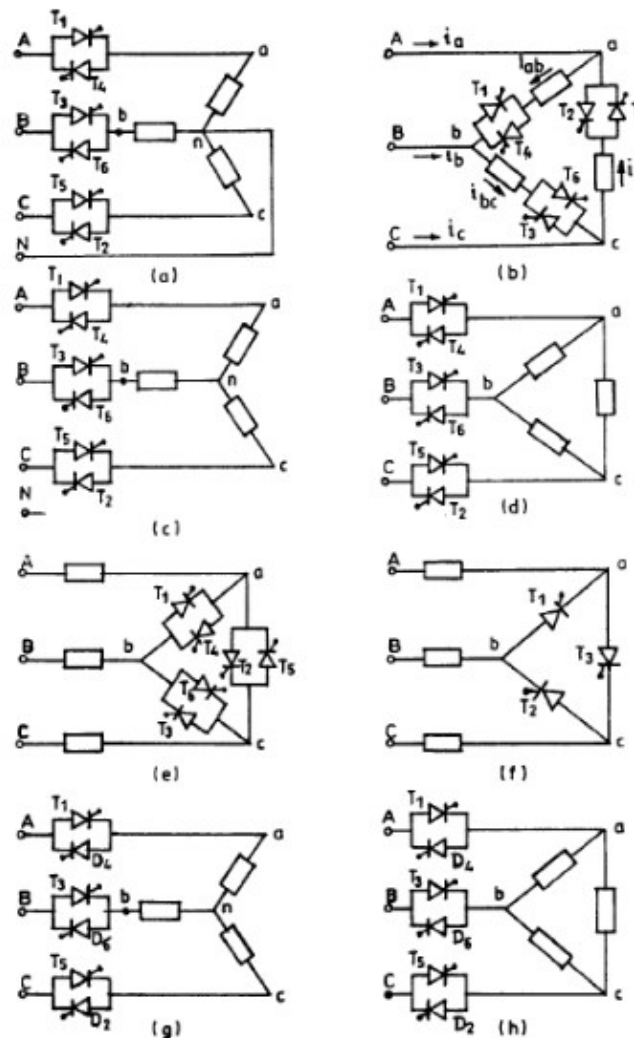


Figura 31. Distintas configuraciones de convertidores ca/ca, para cargas trifásicos c.a.

Mediante el control del ángulo de disparo de los 6 tiristores, es que se obtendrán diferentes valores de tensiones y de corrientes eficaces, para el control de las diferentes cargas trifásicas.

Esta electrónica de potencia (choppers / ca-ca), es muy común encontrarla en el **diseño de los arrancadores suaves**, elementos de control que se deben seleccionar / instalar, y que son utilizados con el objeto de limitar los valores de las corrientes de arranque, para las diferentes cargas eléctricas dinámicas - máquinas asincrónicas o de inducción.

Para la limitación de las corrientes c.a. de arranque, para motores eléctricos de inducción de ca trifásicos (3f).