

Prefacio

El presente documento forma parte del programa de estudios de la materia Electrónica Industrial ofrecida a sus estudiantes en el Instituto Universitario de Tecnología para la informática – Iutepi. Sirve de apoyo complementario bajo la modalidad de autoaprendizaje publicado en su campus virtual, a todos los alumnos que cursan la materia.

Introducción

En los últimos años, la Electrónica de Potencia viene contribuyendo en el desarrollo de nuevas estructuras para el procesamiento de la energía.

Se está volviendo muy común generar energía eléctrica de diversas formas y convertirla en otra forma para poder utilizarla. Como ejemplo de esto, se puede citar las fuentes renovables, bancos de baterías y la transmisión de energía eléctrica en corriente continua (CC), que ponen a disposición la tensión de la red en niveles y formas diferentes de los de la red eléctrica original. Los principales usuarios de estas señales son los equipamientos electrónicos que usan tensiones en niveles diferentes de la disponible de la red eléctrica, los accionamientos de máquinas eléctricas, que modifican la tensión de la red eléctrica (amplitud y frecuencia) para controlar las máquinas, y finalmente en los sistemas eléctricos, la transmisión de energía en CC y la conversión de frecuencia. Todo esto, se ha logrado con el desarrollo de los dispositivos semiconductores: en primer lugar, se utilizaron dispositivos de conmutación natural (diodos), los que presentaban muchas limitaciones de operación y generaban una importante contaminación de armónicos en las redes eléctricas. Estos, posteriormente, fueron evolucionando, pasando por la invención del Rectificador Controlado de Silicio (SCR, por su sigla en inglés), invento que dio inicio a la Electrónica de Potencia moderna. Con el paso del tiempo fueron apareciendo otros dispositivos, como el Triac, tiristores bloqueables por puerta (GTO), transistores bipolares de potencia (BJT), transistores de efecto de campo de potencia (MOSFET), transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), transistores y tiristores de inducción estática (SIT y SITH), tiristores de puerta tipo MOS (MCT), Gate Turn-Off Thyristor (GTO) y tiristor conmutado puerto integrado (IGCT). Estos dispositivos pueden ser clasificados según sus frecuencias de operación y capacidades de procesamiento de energía.

En la actualidad, la Electrónica de Potencia está presente en los convertidores CA/CC (rectificadores), CC/CC (choppers), CC/CA (inversores) y CA/CA (gradadores o convertidores directos de frecuencia).

Los dispositivos más conocidos y difundidos en las industrias y compañías mineras son los variadores de frecuencia (convertidores CA/CA), los que se usan principalmente para el control de velocidad en correas transportadoras. Estos se componen de un rectificador, un condensador de acoplamiento y un inversor, lo que permite ingresar una tensión alterna y tener en la salida otra tensión alterna con magnitud de tensión y frecuencia variable.

Los nuevos dispositivos y estrategias de control utilizadas en la actualidad, rompen el concepto tradicional que se tiene de los convertidores electrónicos de potencia. Siempre se ha comentado que estos son causantes de la generación de armónicos, flicker y otros problemas que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia. Los avances en nuevas topologías, estrategias de control y tecnología de semiconductores, permiten fabricar convertidores con factor de potencia unitario y tasas de distorsión armónica menores al 5%. Dado que estos avances involucran metodologías de control avanzadas, e incluyen más electrónica en su construcción para evitar la generación de armónicos, redundando en una elevación de los precios respecto a las tecnologías clásicas. Podemos resumir cada uno de los convertidores de electrónica de potencia en los siguientes:

Rectificadores

Los rectificadores se emplean en los sistemas eléctricos cuando se requiere una tensión continua, pero se cuenta con alimentación de corriente alterna. Este tipo de dispositivos permiten, de una forma económica, contar con una tensión continua, pero generando niveles de armónicos de considerable magnitud. Existen diversas formas de poder atenuar estos armónicos, por ejemplo: convertidores multipulsos de 12 ó 18 pulsos; inyección de terceras armónicas; y diversas formas encontradas en la literatura correspondiente.

Por otra parte, aprovechando el desarrollo de los semiconductores, sensores y metodologías de control, se pueden emplear los dispositivos de conmutación forzada para crear rectificadores, PFC (Power Factor Correction), con una baja inyección de armónicas.

Choppers

Los reguladores conmutados o choppers son empleados para transformar niveles de tensión continuas, habitualmente conocidos como transformadores de corriente continua (concepto asociado a las máquinas eléctricas estáticas, sabiendo que los transformadores clásicos no funcionan con corrientes continuas, dado que provocan saturación de sus núcleos). De acuerdo a su configuración, los choppers pueden o no emplear aislamiento galvánico. Los más conocidos son utilizados como cargadores de baterías, los que permiten cumplir los ciclos de carga de los diversos tipos de baterías empleadas en la actualidad. Estos dispositivos poseen un amplio desarrollo para aplicaciones, tales como: células de combustible, fuentes de alta tensión CC (Laser), cargadores de baterías de sistemas fotovoltaicos y vehículos eléctricos.

Inversores

Estos dispositivos permiten transformar una tensión continua en tensión o corriente alterna. Debemos recordar que el inversor puede tener su salida en tensión o corriente y de forma pulsada o sinusoidal. La diferencia se logra de acuerdo al empleo de un filtro pasa baja en la salida del inversor.

Los inversores son ampliamente usados para inyectar corriente a la red proveniente de generación de energía eléctrica producidas por ERNC. La topología empleada en éste caso, es un inversor con salida de corriente, donde el equipo permite imponer una corriente sinusoidal, que en algunos casos permite mejorar el comportamiento de la red existente.

Otra forma, donde la Electrónica de Potencia por medio de los inversores es aplicada en mejorar la calidad de energía de las redes eléctricas, es por medio del empleo de filtros activos, que son dispositivos que permiten cubrir las deformaciones provocadas por equipamiento no lineales.

Con el empleo de inversores, por ejemplo en granjas eólicas y fotovoltaicas, es posible inyectar la energía eléctrica permitiendo que operen en isla o conectados a la red. Dado que las magnitudes de potencia son considerables, en muchos casos es necesario conectar varios inversores en paralelo, para que procesen toda la energía generada.

Adicionalmente, cuando grandes bloques de generaciones se encuentran a grandes distancias del consumo, nos vemos en la necesidad de transmitir la energía eléctrica usando tensión continua. La electrónica de potencia permite hacer posible esta aplicación reduciendo los costos en la transmisión de energía eléctrica de largas distancias, dado que las estructuras en corriente continua son más pequeñas y en CC no existen algunos problemas clásicos que

sucedan con la transmisión de CA. De lo expuesto, podemos concluir que en la actualidad los dispositivos de Electrónica de Potencia (EP), se encuentran en todos de los sistemas que procesan en forma estática, la energía eléctrica. Estos permiten que el proceso se realice con pérdidas reducidas y alto rendimiento en los equipos. Así se verifica que la EP moderna genera un mundo de posibilidades en el procesamiento de la energía eléctrica en forma eficiente.

El presente ebook tiene como finalidad ser un complemento al estudiante en esta materia que contempla lo relacionado a temas específicos y de gran importancia para la adecuada comprensión de la Electrónica Industrial.

Contenido del programa de estudios

- Estudio de las Características Eléctricas de los Semiconductores de Potencia de Cuatro Capas.
- Hojas de Datos de los SCR'S
- Controladores de Voltaje AC
- Circuitos de Regulación

Estudio de las Características Eléctricas de los Semiconductores de Potencia de Cuatro Capas.

Las características esenciales que define un dispositivo semiconductor de potencia las podemos resumir en los siguientes puntos:

- 1.-Tener dos estados claramente definidos, uno de alta impedancia (bloqueo) y otro de baja impedancia (conducción). Poder controlar el paso de un estado a otro con facilidad y pequeña potencia.
- 2.-Ser capaces de soportar grandes intensidades y altas Tensiones cuando está en estado de bloqueo, con pequeñas caídas de tensión entre sus electrodos, cuando está en estado de conducción. Ambas condiciones lo capacitan para controlar grandes potencias.
- 3.- Rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro.

Diodo de Cuatro Capas

Los diodos de cuatro capas o como comúnmente se les conoce Tiristores, son una familia de dispositivos que se construye con cuatro capas semiconductoras (pnpn). Estos dispositivos actúan como circuitos abiertos capaces de soportar cierto voltaje nominal hasta que son disparados. Cuando son disparados, se encienden y se convierten en trayectorias de baja resistencia para la corriente y permanecen así, incluso después de que desaparece el disparo. La palabra tiristor viene del griego y significa "puerta", puesto que se comporta como una puerta que se abre y permite el paso de corriente a través de ella. Un tiristor es un dispositivo semiconductor que utiliza realimentación interna para producir un nuevo tipo de conmutación.

El dispositivo consta de un ánodo y un cátodo, donde las uniones son de tipo PNPN entre los mismos. Por tanto se puede modelar como 2 transistores típicos PNP y NPN, por eso se dice también que el tiristor funciona con tensión

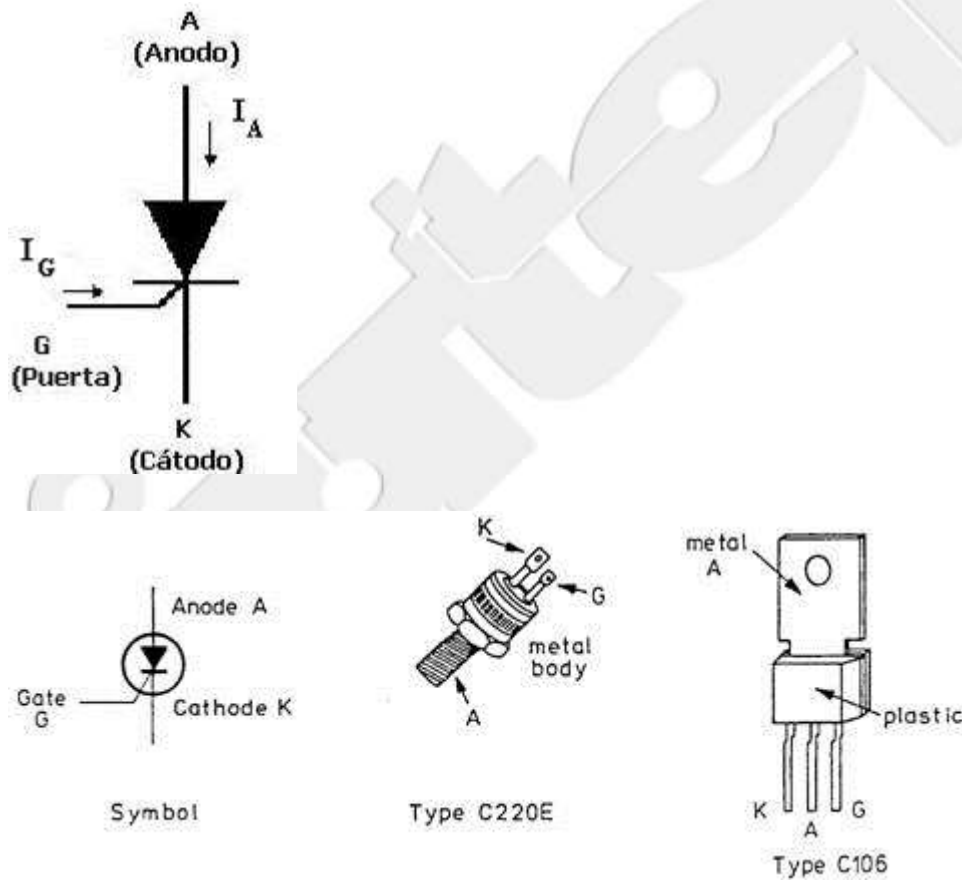
realimentada. Se crean así 3 uniones (denominadas J1, J2, J3 respectivamente), el terminal de puerta está conectado a la unión J2 (unión NP)

Al igual que los FET de potencia, el SCR y el Triac pueden conmutar grandes corrientes. Por ello, la principal aplicación de estos dispositivos es el control de grandes corrientes de carga para motores, calentadores, sistemas de iluminación y otras cargas semejantes. En sí, el tiristor es un conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez, el tiristor es un componente idóneo en electrónica de potencia. El Triac por su parte no es sino la variante bidireccional.

El objetivo de los tiristores es controlar la cantidad de energía que le llega a una carga en un tiempo determinado. Los tiristores se utilizan en forma extensa en los circuitos electrónicos de potencia.

Rectificador Controlado de Silicio SCR

Es un dispositivo semiconductor biestable formado por tres uniones pn con la disposición pnpn. Está formado por tres terminales, llamados Ánodo, Cátodo y Puerta. La conducción entre ánodo y cátodo es controlada por el terminal de puerta. Es un elemento unidireccional (sentido de la corriente es único), conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez.



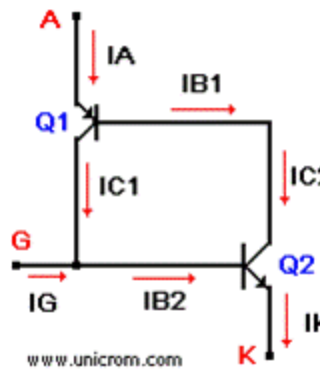
El SCR se asemeja a un diodo rectificador pero si el ánodo es positivo en relación al cátodo no circulará la corriente hasta que una corriente positiva se inyecte en la puerta. Luego el diodo se enciende y no se apagará hasta que no se remueva la tensión en el ánodo-cátodo, de allí el nombre rectificador controlado.

La siguiente figura gráfico muestra un circuito equivalente del SCR para comprender su funcionamiento.

Al aplicarse una corriente I_G al terminal G (base de Q2 y colector de Q1), se producen dos corrientes: $I_{C2} = I_{B1}$.

I_{B1} es la corriente base del transistor Q1 y causa que exista una corriente de colector de Q1 (I_{C1}) que a su vez alimenta la base del transistor Q2 (I_{B2}), este a su vez causa más corriente en I_{C2} , que es lo mismo que I_{B1} en la base de Q1.

Este proceso regenerativo se repite hasta saturar Q1 y Q2 causando el encendido del SCR.



La operación básica del SCR es diferente de la del diodo semiconductor de dos capas fundamental, en que una tercera terminal, llamada compuerta, determina cuándo el rectificador conmuta del estado de circuito abierto al de circuito cerrado. No es suficiente sólo la polarización directa del ánodo al cátodo del dispositivo. En la región de conducción la resistencia dinámica el SCR es típicamente de 0.01 a 0.1 ohm

La resistencia inversa es típicamente de 100 k o más. Un SCR actúa a semejanza de un interruptor. Cuando está encendido (ON), hay una trayectoria de flujo de corriente de baja resistencia del ánodo al cátodo. Actúa entonces como un interruptor cerrado. Cuando está apagado (OFF), no puede haber flujo de corriente del ánodo al cátodo. Por tanto, actúa como un interruptor abierto. Dado que es un dispositivo de estado sólido, la acción de conmutación de un SCR es muy rápida.

Un SCR es disparado en su compuerta por un pulso corto de corriente aplicado a la compuerta. Esta corriente de compuerta (I_G) fluye por la unión entre la compuerta y el cátodo, y sale del SCR por la Terminal del cátodo. La cantidad de corriente de compuerta necesaria para disparar un SCR en particular se simboliza por I_{GT} . Para dispararse, la mayoría de los SCR requieren una corriente de compuerta entre 0.1 y 50 mA ($I_{GT} = 0.1 - 50$ mA). Dado que hay una unión *pn* estándar entre la compuerta y el cátodo, el voltaje entre estas terminales (V_{GK}) debe ser ligeramente mayor a 0.6 V.

Una vez que un SCR ha sido disparado, no es necesario continuar el flujo de corriente de compuerta. Mientras la corriente continúe fluyendo a través de las terminales principales, de ánodo a cátodo, el SCR permanecerá en ON. Cuando la corriente de ánodo a cátodo (I_{AK}) caiga por debajo de un valor mínimo, llamado *corriente de retención*, simbolizada I_{HO} el SCR se apagará. Esto normalmente ocurre cuando la fuente de voltaje de ca pasa por cero a su región negativa. Para la mayoría de los SCR de tamaño mediano, la I_{HO} es alrededor de 10 mA.

CARACTERÍSTICA DEL SCR

La siguiente figura muestra la dependencia entre el voltaje de conmutación y la corriente de compuerta.

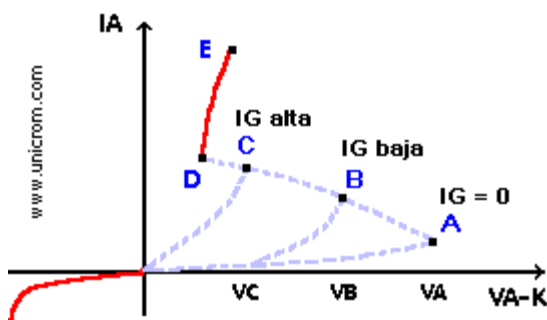
Cuando el **SCR** está polarizado en inversa se comporta como un diodo común (ver la corriente de fuga característica que se muestra en el gráfico).

En la región de polarización en directo el **SCR** se comporta también como un diodo común, siempre que el **SCR** ya haya sido activado (On). Ver los puntos D y E.

Para valores altos de corriente de compuerta (I_G) (ver punto C), el voltaje de ánodo a cátodo es menor (VC).

Si la I_G disminuye, el voltaje ánodo-cátodo aumenta. (ver el punto B y A, y el voltaje ánodo-cátodo VB y VA).

Concluyendo, al disminuir la corriente de compuerta I_G , el voltaje ánodo-cátodo tenderá a aumentar antes de que el **SCR** conduzca (se ponga en On, esté activo)



Características

- Interruptor casi ideal
- Amplificador eficaz
- Fácil controlabilidad
- Características en función de situaciones pasadas (memorias).
- Soportan altas tensiones
- Capacidad para controlar Grandes Potencias
- Relativa rapidez

Estáticas:

Corresponden a la región ánodo- cátodo y son los valores máximos que colocan al elemento en un límite de sus posibilidades

V_{rwm} , V_{drm} , V_t , I_{tav} , I_{trms} , I_r , T_j , I_h

Dinámicas:

Tensiones transitorias

Son valores de tensión que van superpuesto a la señal sinusoidal de la fuente de alimentación. Son de escasa duración, pero de amplitud considerable.

De Conmutación:

Los tiristores necesitan un tiempo para pasar de bloqueo a conducción y viceversa. Para frecuencias inferiores a 400hz podemos ignorar estos efectos. En la mayoría de las aplicaciones se requiere una conmutación más rápida por lo que este tiempo de tenerse en cuenta.

Por Temperatura:

Dependiendo de las condiciones de trabajo de un tiristor, este disipa una cantidad de energía que produce un aumento de la temperatura en las uniones del semiconductor. Este aumento de la temperatura produce un aumento de la corriente de fuga, creando un fenómeno de acumulación de calor que debe ser evitado. Para ello se colocan Disipadores de calor.

Aplicaciones del SCR

Las aplicaciones de los tiristores se extiende desde la rectificación de corrientes alternas, en lugar de los diodos convencionales hasta la realización de determinadas conmutaciones de baja potencia en circuitos electrónicos, pasando por los onduladores o inversores que transforman la corriente continua en alterna. La principal ventaja que presentan frente a los diodos cuando se les utiliza como rectificadores es que su entrada en conducción estará controlada por la señal de puerta. De esta forma se podrá variar la tensión continua de salida si se hace variar el momento del disparo ya que se obtendrán diferentes ángulos de conducción del ciclo de la tensión o corriente alterna de entrada. Además el tiristor se bloqueará automáticamente al cambiar la alternancia de positiva a negativa ya que en este momento empezará a recibir tensión inversa. Por lo anteriormente señalado el SCR tiene una gran variedad de aplicaciones, entre ellas están las siguientes:

Control de motores de CC

Un motor de CC (corriente continua) es una de las primeras máquinas que pueden convertir la energía eléctrica en energía mecánica. Se utiliza un SCR para controlar la cantidad de electricidad que se convierte en energía mecánica. Los circuitos de los motores de CC permiten que la corriente eléctrica se interrumpa manualmente por un pulsador sencillo para facilitar la reposición del SCR. Esto es particularmente útil cuando se administra a los circuitos puros de CC en alarmas o circuitos de disparo de enganche. El voltaje de excitación de un motor de CC controla su velocidad de rotación y la cantidad de energía mecánica que libera. Los tipos más comunes de motores de CC incluyen las bobinas de campo o motores de imanes permanentes, cepillos de CC y motores sin escobillas, y motores de CC con bobinas en serie. Los motores de corriente continua se pueden encontrar en las perforadoras manuales basadas en servomotores y electrodomésticos de cocina, robótica y aplicaciones de automoción (frenos).

Relés de estado sólido

Un relé de estado sólido (SSR) es un dispositivo electrónico que facilita el encendido/apagado de una máquina en particular o aparato electrónico. Por lo general utilizan varios semiconductores, tales como el SCR, para facilitar el encendido/apagado sin problemas. Los relés de estado sólido requieren de baja facilitación de la energía del circuito para cambiar de encendido a apagado y viceversa, por lo que la potencia de salida es significativamente mayor en comparación con el control de la energía. El SSR se utiliza en el control de temperatura y dispositivos de medición, en indicadores de nivel de flujo y medidores, conductividad e instrumentación de pH, calentadores, y medidores de presión y deformación.

Control de motores de CA

Los motores de CA (corriente alterna) suelen tener dos SCR conectados en estructuras paralelas inversas, produciendo técnicamente conmutadores back-to-back. Esta configuración permite que el motor tenga una capacidad bidireccional para "mover" la electricidad. Los motores de CA tienen tres configuraciones principales: montados en poste, en módulo y disco o en forma de disco de hockey. Los controladores modernos utilizan los dos últimos tipos. Las aplicaciones de corriente más alta que requieren de un enfriamiento del semiconductor satisfactorio utilizan la configuración del sistema de disco de hockey. Los módulos SCR tienen el SCR encerrado dentro de una unidad de contención de plástico incluido en una placa de montaje. Estos tipos proporcionan mejores capacidades de sobre corriente relativas.

Sistemas de control de iluminación

Los sistemas de iluminación de estado sólido (reguladores de luz) se basan en el ciclo de trabajo del interruptor de encendido y apagado para facilitar el control de las luces a través de una aplicación plena de tensión de CA. Estos sistemas tienen una perilla para controlar los ajustes de brillo y determinar en qué punto cambiar de encendido a apagado. Un disparo de SCR provoca el paso de corriente continua hasta que toda la corriente se haya agotado. Los ciclos de trabajo se cambian mediante la alteración de las etapas de activación del SCR, produciendo luz de regulación en los puntos especificados. Esta configuración requiere de la presencia de un fusible para proteger contra fallos de transmisión.

Otras aplicaciones del SCR incluyen:

- Controles de relevador.
- Circuitos de retardo de tiempo.
- Fuentes de alimentación reguladas.
- Interruptores estáticos.
- Controles de motores.
- Recortadores.
- Inversores.
- Ciclo conversores.
- Cargadores de baterías.
- Circuitos de protección.
- Controles de calefacción.
- Controles de fase.

Ventajas

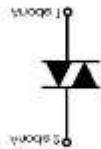
- Requiere poca corriente de gate para disparar una gran corriente directa
- Puede bloquear ambas polaridades de una señal de A.C.
- Bloquea altas tensiones y tiene caídas en directa pequeñas

Desventajas

- El dispositivo no se apaga con $I_g=0$
- No pueden operar a altas frecuencias
- Pueden dispararse por ruidos de tensión
- Tienen un rango limitado de operación con respecto a la temperatura.

Diodo Bilateral (DIAC)

El DIAC (Diodo para Corriente Alterna) es un dispositivo semiconductor doble de dos conexiones. Es un diodo bidireccional autodisparable que conduce la corriente sólo tras haberse superado su tensión de disparo alternativa, y mientras la corriente circulante no sea inferior al valor triple de voltios característico para ese dispositivo. El comportamiento es variable para ambas direcciones de la corriente. La mayoría de los DIAC tienen una tensión de disparo doble variable de alrededor de 30 V. En este sentido, su comportamiento es similar a una lámpara de neón. Su funcionamiento se centra en aplicaciones a frecuencia de red.

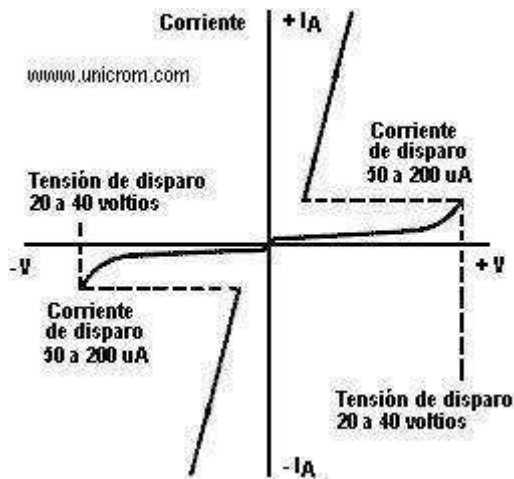


(Símbolo del DIAC)

Existen dos tipos de DIAC:

- DIAC de tres capas: Es similar a un transistor bipolar sin conexión de base y con las regiones de colector y emisor iguales y muy dopadas. El dispositivo permanece bloqueado hasta que se alcanza la tensión de avalancha en la unión del colector. Esto inyecta corriente en la base que vuelve el transistor conductor, produciéndose un efecto regenerativo. Al ser un dispositivo simétrico, funciona igual en ambas polaridades, intercambiando el emisor y colector sus funciones.
- DIAC de cuatro capas. Consiste en dos diodos Shockley conectados en antiparalelo, lo que le da la característica bidireccional.

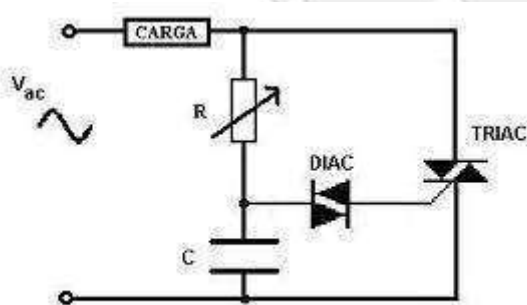
Su curva característica se muestra a continuación.



-
- En la curva característica tensión-corriente se observa que: $-V(+ \text{ ó } -) < V_{b0}$, el elemento se comporta como un circuito abierto. $-V(+ \text{ ó } -) > V_{b0}$, el elemento se comporta como un cortocircuito.
- Hasta que la tensión aplicada entre sus extremos supera la tensión de disparo V_{b0} ; la intensidad que circula por el componente es muy pequeña. Al superar dicha tensión la corriente aumenta bruscamente, disminuyendo como consecuencia la tensión.

Aplicaciones

- Se emplea normalmente en circuitos que realizan un control de fase de la corriente del triac, de forma que solo se aplica tensión a la carga durante una fracción de ciclo de la alterna. Estos sistemas se utilizan para el control de iluminación con intensidad variable, calefacción eléctrica con regulación de temperatura y algunos controles de velocidad de motores.



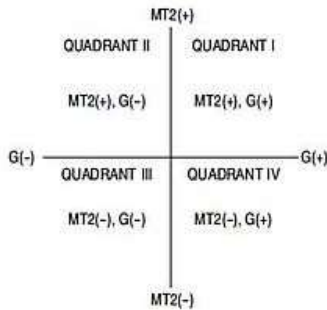
-
- La forma más simple de utilizar estos controles es empleando el circuito representado en la Figura, en que la resistencia variable R carga el condensador C hasta que se alcanza la tensión de disparo del DIAC, produciéndose a través de él la descarga de C, cuya corriente alcanza la puerta del TRIAC y le pone en conducción. Este mecanismo se produce una vez en el semiciclo positivo y otra en el negativo. El momento del disparo podrá ser ajustado con el valor de R variando como consecuencia el tiempo de conducción del TRIAC y, por tanto, el valor de la tensión media aplicada a la carga, obteniéndose un simple pero eficaz control de potencia.

Diodo Bilateral Controlado (TRIAC)

El triac es un dispositivo semiconductor de tres terminales que se usa para controlar el flujo de corriente promedio a una carga, con la particularidad de que conduce en ambos sentidos y puede ser bloqueado por inversión de la

tensión o al disminuir la corriente por debajo del valor de mantenimiento. El triac puede ser disparado independientemente de la polarización de puerta, es decir, mediante una corriente de puerta positiva o negativa.

Funcionamiento a la luz de la teoría de los cuadrantes:



Modos de activación. Cuadrantes, 1 (arriba a la derecha), 2 (arriba a la izquierda), 3 (abajo a la izquierda), 4 (abajo a la derecha)

La sensibilidad relativa depende de la estructura física de un triac particular, pero por regla general, el cuadrante I es el más sensible (menor corriente de puerta requerida), y el cuadrante 4 es el menos sensible (la mayoría de la corriente de puerta requerida).

En los cuadrantes 1 y 2, MT2 es positivo, y la corriente fluye de MT2 a MT1 a través de capas P, N, P y N. La región N unida a MT2 no participa significativamente. En los cuadrantes 3 y 4, MT2 es negativo, y la corriente fluye de MT1 a MT2, también a través de capas P, N, P y N. La región N unida a MT2 está activa, pero la región N unida a MT1 sólo participa en el disparo inicial, pero no contribuye al flujo inicial de corriente.

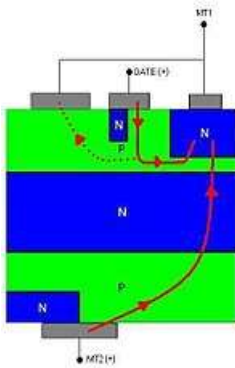
En la mayoría de las aplicaciones, la corriente de puerta proviene de MT2, por lo que los cuadrantes 1 y 3 son los únicos modos de funcionamiento (ambos puerta y MT2 positivos o negativos contra MT1). Otras aplicaciones con disparador de polaridad única desde un circuito de excitación IC o digital operan en los cuadrantes 2 y 3, de lo que MT1 se conecta normalmente a voltaje positivo (por ejemplo, + 5V) y la compuerta se baja a 0V (masa).

Cuadrante 1

La operación del Cuadrante 1 ocurre cuando la compuerta y MT2 son positivas con respecto a MT1.

La corriente de puerta activa un interruptor de transistor NPN equivalente, que a su vez atrae corriente desde la base de un transistor PNP equivalente, activándose también. Parte de la corriente de puerta (línea de puntos) se pierde a través del camino óhmico a través del silicio con dopaje p, fluyendo directamente en MT1 sin pasar a través de la base del transistor NPN. En este caso, la inyección de agujeros en el p-silicio hace que las capas apiladas n, p y n debajo de MT1 se comporten como un transistor NPN, que se activa debido a la presencia de una corriente en su base. Esto, a su vez, hace que las capas p, n y p sobre MT2 se comporten como un transistor PNP, que se activa porque su base de tipo n se polariza hacia delante con respecto a su emisor (MT2). Por lo tanto, el esquema de activación es el mismo que un SCR.

Sin embargo, la estructura es diferente de SCRs. En particular, TRIAC siempre tiene una pequeña corriente que fluye directamente desde la puerta a MT1 a través del silicio de dopaje tipo p sin pasar por la unión p-n entre la base y el emisor del transistor NPN equivalente. Esta corriente se indica mediante una línea roja punteada y es la razón por la cual un TRIAC necesita más corriente de puerta para encenderse que un SCR comparablemente clasificado.



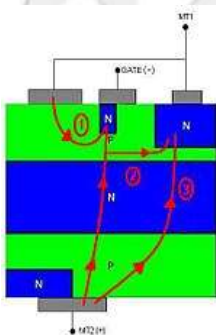
Triacs en cuadrante 1

Cuadrante 2

La operación del Cuadrante 2 ocurre cuando la puerta es negativa y MT2 es positiva con respecto a MT1.

El encendido del dispositivo es triple y comienza cuando la corriente de MT1 fluye hacia la compuerta a través de la unión p-n bajo la compuerta. Esto conmuta una estructura compuesta por un transistor NPN y un transistor PNP, que tiene la puerta como cátodo.

A medida que aumenta la corriente en la puerta, el potencial del lado izquierdo del silicio p bajo la puerta se eleva hacia MT1, ya que la diferencia de potencial entre la puerta y MT2 tiende a bajar: esto establece una corriente entre el lado izquierdo y el derecho del silicio p, que a su vez activa el transistor NPN bajo el terminal MT1 y como consecuencia también el transistor PNP entre MT2 y el lado derecho del p-silicio superior. Así, al final, la estructura que es atravesada por la mayor parte de la corriente es la misma que la operación de cuadrante-I

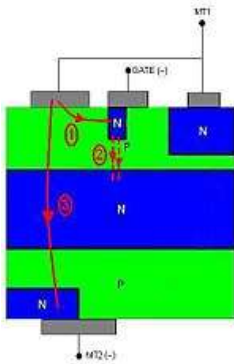


Triacs en cuadrante 2

Cuadrante 3

La operación del Cuadrante 3 ocurre cuando la puerta y MT2 son negativas con respecto a MT1.

El proceso también ocurre en diferentes etapas. En la primera fase, la unión pn entre el terminal MT1 y la puerta se polariza hacia delante (paso 1). Como la polarización directa implica la inyección de portadores minoritarios en las dos capas que se unen a la unión, se inyectan electrones en la capa p bajo la compuerta. Algunos de estos electrones no se recombinan y escapan a la región n subyacente (etapa 2). Esto a su vez reduce el potencial de la región n, actuando como la base de un transistor pnp que se enciende (girar el transistor sin bajar directamente el potencial de base se denomina control de puerta remota). La capa p inferior actúa como colector de este transistor PNP y tiene su voltaje aumentado: en realidad, esta capa p actúa también como la base de un transistor NPN formado por las tres últimas capas justo encima del terminal MT2 que, en a su vez, se activa.

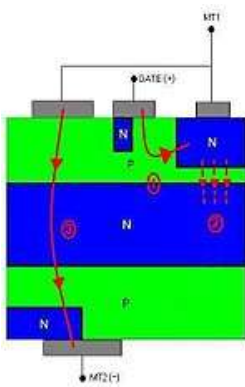


Triac en cuadrante 3

Cuadrante 4

La operación del Cuadrante 4 ocurre cuando la puerta es positiva y MT2 es negativa con respecto a MT1.

La activación en este cuadrante es similar a la activación en el cuadrante 3. El proceso utiliza un control de puerta remoto. A medida que la corriente fluye desde la capa p bajo la puerta en la capa n bajo MT1, se inyectan portadores minoritarios en forma de electrones libres en la región p algunos de ellos se recogen por la unión np subyacente y pasan a la unión contigua n-región sin recombinar. Como en el caso de un disparo en el cuadrante 3, esto reduce el potencial de la capa n y activa el transistor PNP formado por la capa n y las dos capas p a su lado. La capa p inferior actúa como colector de este transistor PNP y tiene su voltaje aumentado: en realidad, esta capa p actúa también como la base de un transistor NPN formado por las tres últimas capas justo encima del terminal MT2, que a su vez se activa.



Triac en cuadrante 4

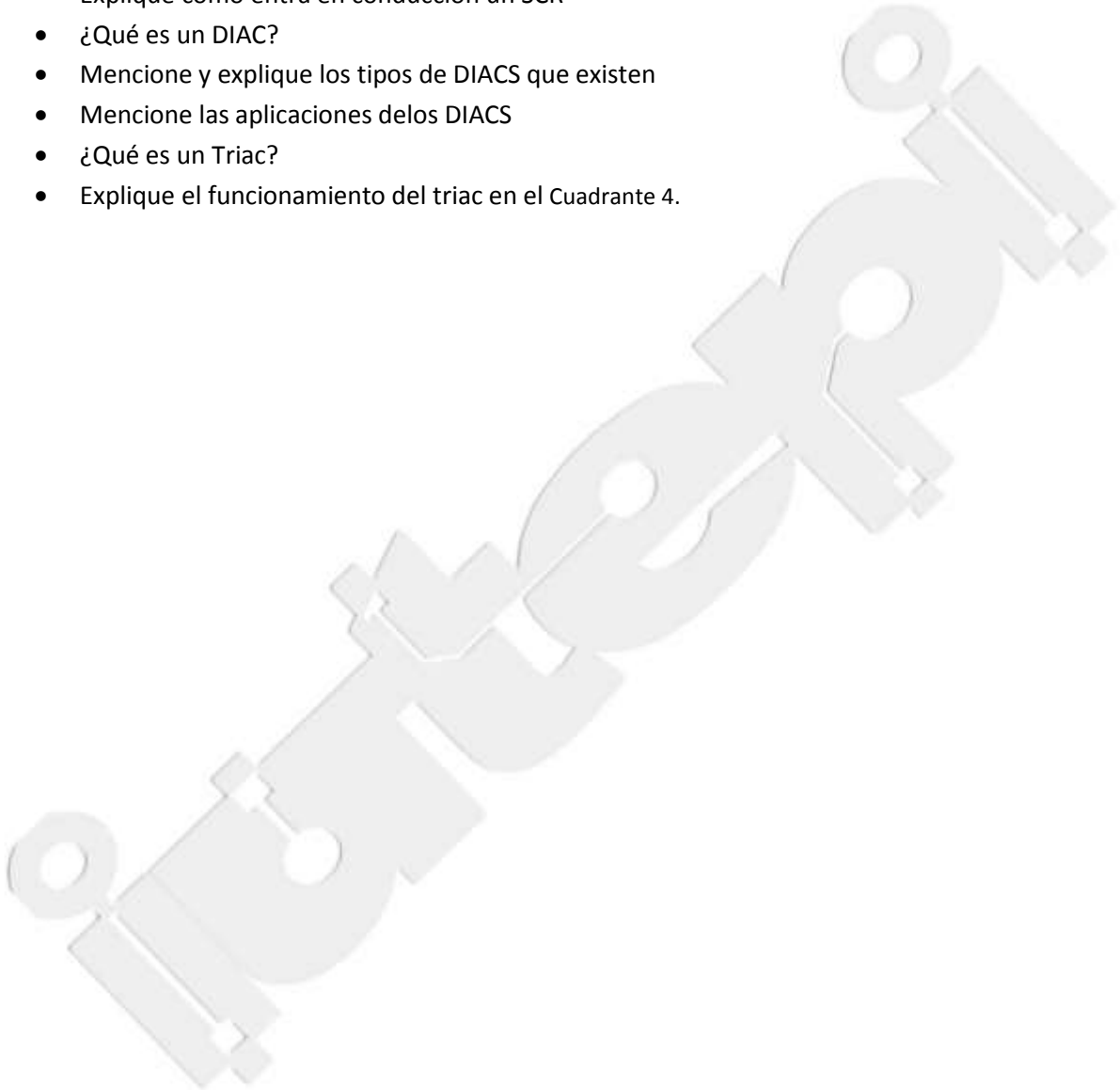
Aplicaciones:

- Su versatilidad lo hace ideal para el control de corrientes alternas.
- Una de ellas es su utilización como interruptor estático ofreciendo muchas ventajas sobre los interruptores mecánicos convencionales y los relés.
- Funciona como interruptor electrónico y también a pila.
- Se utilizan TRIACs de baja potencia en muchas aplicaciones como atenuadores de luz, controles de velocidad para motores eléctricos, y en los sistemas de control computarizado de muchos elementos caseros. No obstante, cuando se utiliza con cargas inductivas como motores eléctricos, se deben tomar las precauciones necesarias para asegurarse que el TRIAC se apaga correctamente al final de cada semiciclo de la onda de Corriente alterna.

Debido a su poca estabilidad en la actualidad su uso es muy reducido.

Autoevaluación

- ¿Qué es un tiristor y cómo funciona?
- ¿Cuál es la corriente de mantenimiento de un SCR?
- Explique cómo entra en conducción un SCR
- ¿Qué es un DIAC?
- Mencione y explique los tipos de DIACS que existen
- Mencione las aplicaciones de los DIACS
- ¿Qué es un Triac?
- Explique el funcionamiento del triac en el Cuadrante 4.



Hojas de Datos de los SCR`S

A la hora de seleccionar un SCR tenemos un abanico de posibilidades en cuanto a que tipo de tiristor y sus características, por eso es muy importante conocer sus hojas de especificaciones y los parámetros de diseño a considerar. Algunos parámetros de interés de los SCR`S son:

Tiempo de subida (Rise time).

tgt; ton:

Tiempo de paso a conducción. (Gate - controlled turn – on time).

tq; toff:

Tiempo de bloqueo, (Circuit - commutated turn - off time). Intervalo de tiempo necesario para que el tiristor pase al estado de bloqueo de manera que aunque se aplique un nuevo voltaje en sentido directo, no conduce hasta que haya una nueva señal de puerta.

di/dt:

Valor mínimo de la pendiente de la intensidad por debajo de la cual no se producen puntos calientes.

dv/dt:

Valor mínimo de la pendiente de tensión por debajo de la cual no se produce el cebado sin señal de puerta.

Especificaciones especiales

El SCR necesita una corriente mínima de mantenimiento (IH) para que se mantenga en conducción y una corriente de enclavamiento (IL) para que el dispositivo pueda permanecer en conducción cuando se eliminan los pulsos de la puerta.

VGt e IGt , que determinan las condiciones de encendido del dispositivo semiconductor.

VGNT e IGNT, dan los valores máximos de corriente y de tensión, para los cuales en condiciones normales de temperatura, los tiristores no corren el riesgo de dispararse de modo indeseado. El máximo de voltaje suele ser 1,5 Kv y la corriente máxima es de 1 KA.

PGM potencia máxima.

La frecuencia de conmutación es baja alrededor de 60 Hz.

A continuación se muestra una hoja de especificaciones para un SCR.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
*Peak Blocking Current ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$, gate open, $T_J = 25^\circ\text{C}$) ($T_J = 110^\circ\text{C}$)	I_{DRM}	—	—	10 2	μA mA
*On-State Voltage (Either Direction) ($I_{TM} = 6 \text{ A Peak}$)	V_{TM}	—	—	2	Volts
*Peak Gate Trigger Voltage (Continuous dc) (Main Terminal Voltage = 12 Vdc, $R_L = 100 \text{ Ohms}$, $T_J = -40^\circ\text{C}$) MT2(+), G(+); MT2(-), G(-) All Types MT2(+), G(-); MT2(-), G(+) (Main Terminal Voltage = Rated V_{DRM} , $R_L = 10 \text{ k ohms}$, $T_J = 110^\circ\text{C}$) MT2(+), G(+); MT2(-), G(-) All Types MT2(+), G(-); MT2(-), G(+)	V_{GT}	— —	1.4 1.4	2.5 2.5	Volts
*Holding Current (Either Direction) (Main Terminal Voltage = 12 Vdc, Gate Open, $T_J = -40^\circ\text{C}$) (Initiating Current = 1 Adc) 2N6071A,B, 2N6073A,B, 2N6075A,B ($T_J = 25^\circ\text{C}$) 2N6071A,B, 2N6073A,B, 2N6075A,B	I_H	— —	— —	30 15	mA
Turn-On Time (Either Direction) ($I_{TM} = 14 \text{ Adc}$, $I_{GT} = 100 \text{ mAdc}$)	t_{on}	—	1.5	—	μs
Blocking Voltage Application Rate at Commutation @ V_{DRM} , $T_J = 85^\circ\text{C}$, Gate Open, $I_{TM} = 5.7 \text{ A}$, Commutating $di/dt = 2.0 \text{ A/ms}$	$dv/dt(c)$	—	5	—	V/ μs

*Indicates JEDEC Registered Data.

A continuación se dejan enlaces de hojas de datos de fabricantes de SCR`S

[Hoja de datos1](#)

[Hoja de datos2](#)

[Hoja de datos3](#)

Hablemos un poco de algunas de las protecciones en líneas generales utilizadas para todos los tiristores

Las primeras protecciones incluidas en los semiconductores bloqueables fueron las precauciones térmicas, los radiadores y las protecciones eléctricas y los fusibles. A menudo, es indispensable, y en todos los casos deseable, completar estos dispositivos con circuitos electrónicos encargados de limitar los efectos de las dv/dt y las sobrecargas de intensidad.

Protección contra di/dt .

Cuando la carga posee un componente capacitivo, es posible establecer bruscamente una corriente aun valor elevado desde el instante en que el tiristor comienza a cebarse. El gradiente de intensidad di/dt impuesto al tiristor puede ser perjudicial para éste, como ya hemos visto. En el caso en que pueda temerse la aparición de valores importantes de di/dt , es necesario asegurar que la corriente de puerta que provoca el cebado se establezca con mucha rapidez a un valor suficientemente elevado. Si el valor de di/dt amenaza con sobrepasar el valor límite indicado por el constructor, es preciso proteger el tiristor añadiéndole una pequeña inductancia en serie. Los mejores resultados son los que se obtienen por medio de una inductancia saturable. Mientras la inductancia no se sature, la corriente que la atraviesa será

relativamente baja; cuando la inductancia se satura, se comporta como un cortocircuito; su acción viene a retardar el establecimiento de la corriente.

Protección contra dv/dt

La conexión brusca a la alimentación de circuitos próximos que contengan una carga inductiva o variaciones exageradas en la fuerza contra electromotriz de la carga (por ejemplo, si está constituida por el rotor de un motor de colector) pueden provocar variaciones bruscas de la tensión de alimentación mientras el tiristor se encuentre en estado de bloqueo. Hemos visto que las dv/dt correspondientes amenazan con recibir de forma intempestiva el tiristor (o triac, o GTO). El procedimiento más corriente para reducir la velocidad de subida de la tensión consiste en colocar un condensador en los bornes del tiristor (o el triac). Pero la sobrecarga de intensidad y la di/dt , que introduciría la descarga brusca de esta capacidad en los momentos de cebado, podrían ser perjudiciales para el tiristor.

En la mayoría de las aplicaciones en carga inductiva de los tiristores o de los triacs, el usuario se ve impulsado a montar entre ánodo y cátodo una red RC destinada a eliminar los riesgos de cebados intempestivos por parásitos o de recibados espontáneos por dv/dt . La capacidad C y la impedancia de la carga atenúan los frentes de tensión transmitidos por la red o reaplicados en conmutación en la carga inductiva. Esta red RC posee también una segunda ventaja. La energía acumulada en el condensador C en el momento del descebado se reinyecta seguidamente en el tiristor en el cebado. La velocidad de crecimiento de la corriente en el tiristor durante la descarga del condensador no está entonces limitada más que por la tensión de pico de carga del condensador y la inductancia de conexión del circuito "snubber" al tiristor. La amplitud de la corriente es el cociente entre la tensión de pico de carga del condensador y la resistencia en serie R. Este circuito permite, así, superar muy rápidamente la corriente de enganche IL.

En la utilización del circuito RC es, sin embargo, recomendable no trabajar con una resistencia en serie R demasiado pequeña. En la práctica, el efecto conjugado en el momento del cebado de la corriente $IT1$ (igual al cociente entre la tensión de carga del condensador y la resistencia R) y de la pérdida de corriente dIT/dt (igual al cociente entre la tensión de carga del condensador y la inductancia de las conexiones triac-circuito RC) puede resultar peligroso para el semiconductor. Se aconseja un valor de R superior a 10 ohmios.

Los valores de R y de C se elaboran en función de la corriente I en la carga (en amperios eficaces) y del valor de dv/dt admisible. Estos valores han sido establecidos para el peor de los casos posibles: una carga puramente inductiva, es decir, con un $\cos\phi = 0$. Para valores mejores del $\cos\phi$, el valor de la tensión de pico debe reducirse en la misma proporción; por ejemplo, sean 200 V de pico correspondientes a $\cos\phi = 0$; si $\cos\phi$ pasa a ser 0,7, la tensión de pico se hará igual a: $200 \times 0,7 = 140$ V. Para utilizar estos gráficos, debemos situarnos en el diagrama correspondiente a la tensión deseada y proceder del modo siguiente:

a) Trazar una vertical a partir de la corriente nominal prevista.

b) El corte de esta vertical con la recta oblicua dv/dt admisible, marcada con trazo continuo, tiene como ordenada, en la escala de la izquierda, el valor de C en microfaradios. Su corte con la recta oblicua dv/dt , sugerida ser marcada en línea de puntos para no confundir, proporciona el valor de R en ohmios en la escala de la derecha.



Autoevaluación

- Mencione algunas de las especificaciones técnicas del SCR C106
- Explique en qué consiste la Limitación di/dt - dv/dt de un SCR
- Explique en qué consisten los Tiempos de “turn-on” - “turn-off” de un SCR



Controladores de Voltaje AC

Si un tiristor conmutador se conecta entre la alimentación de Ca y la carga, es posible controlar el flujo de potencia variando el valor Rms del voltaje de Ca aplicado a la carga; este tipo de circuito de potencia se conoce como un controlador de voltaje de Ca.

Para la transferencia de potencia, normalmente se utilizan dos tipos de control:

1. Control de abrir y cerrar
2. Control de ángulo de fase

En el control de abrir y cerrar, los tiristores conectan la carga a la fuente de CA durante unos cuantos ciclos de voltaje de entrada y a continuación la desconectan por unos cuantos ciclos más. En el control de ángulo de fase, los tiristores conectan la carga a la fuente de CA durante una porción de cada uno de los ciclos de voltaje de entrada.

Los controladores de voltaje de CA se pueden clasificar en dos tipos:

- (1) Controladores monofásicos
- (2) Controladores trifásicos.

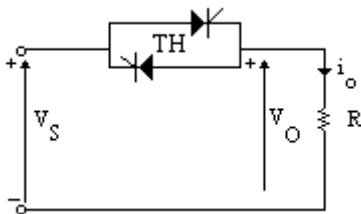
Cada uno de estos tipos se puede subdividir en (a) unidireccional o control de media onda y (b) bidireccional o control de onda completa.

Dado que el voltaje de entrada es de CA, los tiristores son conmutados por línea, no hay necesidad de circuitería adicional de conmutación.

PRINCIPIO DEL CONTROL DE ABRIR Y CERRAR

El principio de control de abrir y cerrar se puede explicar en un controlador de onda completa monofásico, tal y como se muestra en la figura siguiente. El tiristor conecta la alimentación de CA a la carga durante un tiempo t_n ; un pulso inhibitor de compuerta abre el interruptor durante un tiempo t_0 .

El tiempo activo, t_n , está formado, por lo común, de un número entero de ciclos.

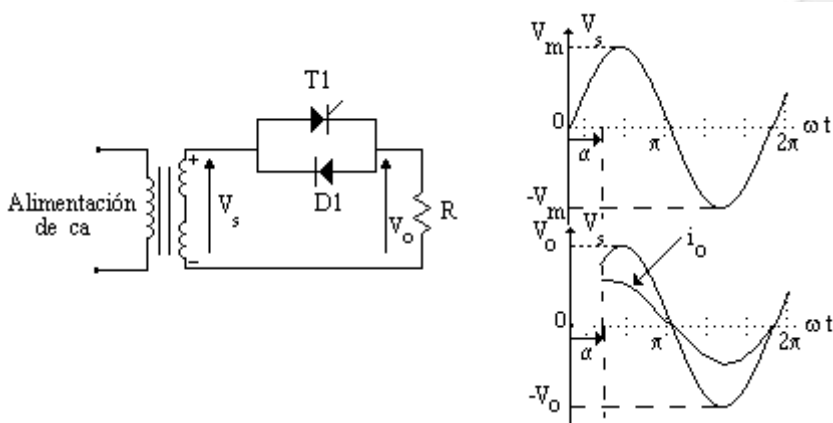


Control de abrir y cerrar.

Debido a la conmutación en voltaje y en corriente cero de los tiristores, las armónicas generadas por las acciones de conmutación son reducidas.

PRINCIPIO DE CONTROL DE FASE

El principio de control de fase se puede explicar haciendo referencia a la figura siguiente. El flujo de potencia hacia la carga queda controlado retrasando el ángulo de disparo del tiristor T_1 . Debido a la presencia del diodo D_1 , el rango de control está limitado y el voltaje RMS efectivo de salida sólo puede variar entre 70.7 y 100%. El voltaje de salida y la corriente de entrada son asimétricos y contienen una componente de CD. Si hay un transformador de entrada puede ocurrir un problema de saturación. Este circuito es un controlador monofásico de media onda, adecuado sólo para cargas resistivas de poca potencia, como son la calefacción y la iluminación. Dado que el flujo de potencia está controlado durante el semiciclo del voltaje de entrada, este tipo de controlador también se conoce como controlador unidireccional.

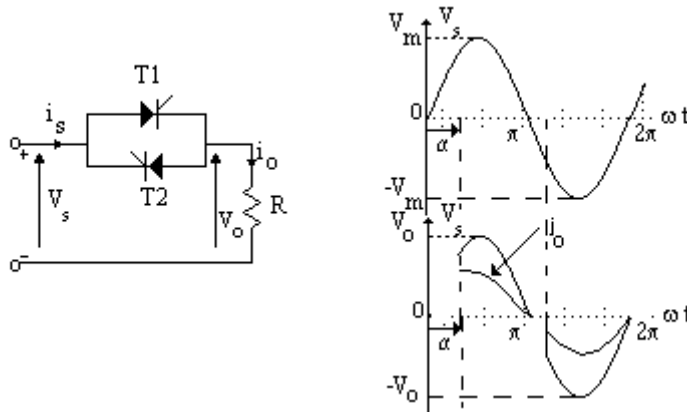


Control de ángulo monofásico.

Controladores Monofásicos

El problema de la cd de entrada se puede evitar utilizando control bidireccional (o de onda completa), en la figura siguiente aparece un controlador monofásico de onda completa con carga completa.

Durante el semiciclo de voltaje de entrada, se controla el flujo de potencia variando el ángulo de retraso del tiristor T_1 ; el tiristor T_2 controla el flujo de potencia durante el semiciclo de voltaje de entrada. Los pulsos de disparo de T_1 y T_2 se conservan a 180º uno del otro.



Controlador monofásico de onda completa.

Métodos para activar un SCR.

Un SCR es disparado por un pulso corto de corriente aplicado a la compuerta. Esta corriente de compuerta (I_G) fluye por la unión entre la compuerta y el cátodo, y sale del SCR por la terminal del cátodo. La cantidad de corriente de compuerta necesaria para disparar un SCR en particular se simboliza por I_{GT} . Para dispararse, la mayoría de los SCR requieren una corriente de compuerta entre 0.1 y 50 mA ($I_{GT} = 0.1 - 50$ mA). Dado que hay una unión pn estándar entre la compuerta y el cátodo, el voltaje entre estas terminales (V_{GK}) debe ser ligeramente mayor a 0.6 V.

Métodos de disparo

Para que se produzca el cebado de un SCR, la unión ánodo - cátodo debe estar polarizada en directo y la señal de mando debe permanecer un tiempo suficientemente larga como para permitir que el tiristor alcance un valor de corriente de ánodo mayor que I_L , corriente necesaria para permitir que el SCR comience a conducir. Para que, una vez disparado, se mantenga en la zona de conducción deberá circular una corriente mínima de valor I_H , marcando el paso del estado de conducción al estado de bloqueo directo.

Los distintos métodos de disparo de los SCR son:

- Por puerta.
- Por módulo de tensión.
- Por gradiente de tensión (dV/dt)
- Disparo por radiación.

- Disparo por temperatura.

El modo usado normalmente es el disparo por puerta. Los disparos por módulo y gradiente de tensión son modos no deseados.

Disparo por puerta.

Es el proceso utilizado normalmente para disparar un tiristor. Consiste en la aplicación en la puerta de un impulso positivo de intensidad, entre los terminales de puerta y cátodo a la vez que mantenemos una tensión positiva entre ánodo y cátodo.

- El valor requerido de V_T necesario para disparar el SCR es: $V_T = V_G + I_G \times R$

- R viene dada por la pendiente de la recta tangente a la curva de máxima disipación de potencia para obtener la máxima seguridad en el disparo

$$R = V_{FG} / I_{FG}$$

Disparo por módulo de tensión.

Es el debido al mecanismo de multiplicación por avalancha. Esta forma de disparo no se emplea para disparar al tiristor de manera intencionada; sin embargo ocurre de forma fortuita provocada por sobre tensiones anormales en los equipos electrónicos.

Disparo por gradiente de tensión.

Una subida brusca del potencial de ánodo en el sentido directo de conducción provoca el disparo. Este caso más que un método, se considera un inconveniente.

Disparo por radiación.

Está asociado a la creación de pares electrón-hueco por la absorción de la luz del elemento semiconductor. El SCR activado por luz se llama LASCR.

Disparo por temperatura.

El disparo por temperatura está asociado al aumento de pares electrón - hueco generados en las uniones del semiconductor. Así, la suma de las corrientes tiende rápidamente al aumentar la temperatura. La tensión de ruptura permanece constante hasta un cierto valor de la temperatura y disminuye al aumentar ésta.

Controladores trifásicos de Onda Completa

Los controladores unidireccionales, que contienen corriente de entrada de cd y un contenido de armónicas más alto debido a la naturaleza asimétrica de la forma de onda del voltaje de salida no se utilizan normalmente en los impulsores para motores de ca; por lo general se utiliza un control bidireccional trifásico.

La operación de este controlador es similar a la de un controlador de media onda, excepto porque la trayectoria de la corriente de regreso está dada por los tiristores T_2 , T_4 y T_6 en vez de los diodos. La secuencia de disparo de los tiristores es T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 .

Si definimos los voltajes instantáneos de entrada por fase como.

$$v_{AN} = \sqrt{2}V_s \text{ sen } \omega t \quad (1)$$

$$v_{BN} = \sqrt{2}V_s \text{ sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2)$$

$$v_{CN} = \sqrt{2}V_s \text{ sen} \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (3)$$

Los voltajes instantáneos de línea de entrada son:

$$v_{AB} = \sqrt{6}V_s \text{ sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (4)$$

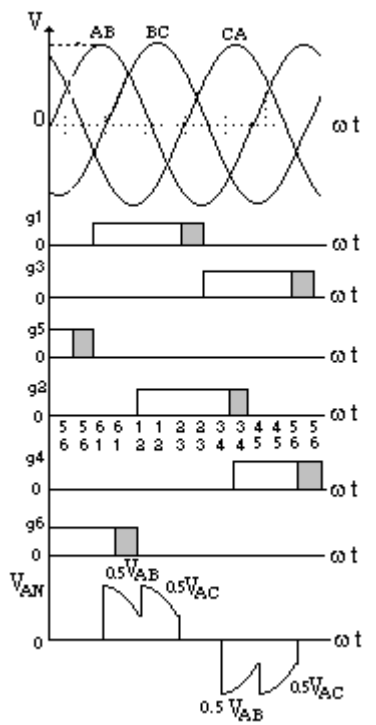
$$v_{BC} = \sqrt{6}V_s \text{ sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

Para $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$, dos tiristores conducen inmediatamente antes del disparo de T_1 . Una vez disparado T_1 , conducen tres tiristores. Un tiristor se desconecta cuando su corriente intenta invertirse. Las condiciones se alternan entre dos y tres tiristores en conducción. Las formas de onda resultantes pueden observarse en la figura siguiente

Para $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, sólo conducen dos tiristores en todo momento. Para $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$, aunque conducen dos tiristores en todo momento, existen períodos en los que ningún tiristor está activo. Para $\alpha \geq 150^\circ$, no hay ningún período para dos tiristores en conducción haciéndose el voltaje de salida cero en $\alpha = 150^\circ$. El rango del ángulo de retraso es

$$0 \leq \alpha \leq 150^\circ$$

(6)



Formas de onda en el control de onda completa.

Configuración Estrella (Y)

En la figura a continuación aparece el diagrama de circuito de un controlador trifásico de media onda (o unidireccional) con una carga resistiva conectada en estrella. El flujo de corriente hacia la carga está controlado mediante los tiristores T₁, T₃ y T₅; los diodos proporcionan la trayectoria de corriente de regreso. La secuencia de disparo de los tiristores es T₁, T₃, T₅. Para que fluya la corriente a través del controlador de corriente, por lo menos un tiristor debe conducir. Si todos los dispositivos fueran diodos, tres diodos conducirían simultáneamente siendo el ángulo de conducción de cada uno de ellos de 180°. Una vez que un tiristor empieza a conducir, sólo puede desactivarse cuando su corriente disminuye a cero.

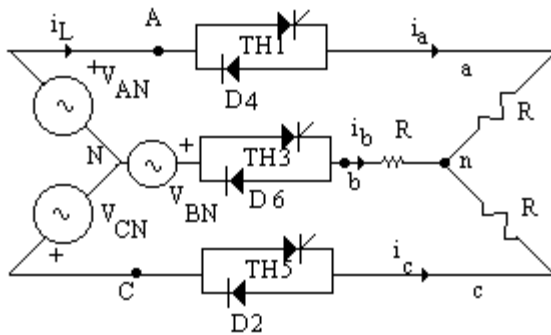


Figura. Configuración Estrella.

Configuración Delta

Si los terminales de un sistema trifásico están accesibles, los elementos de control (o los dispositivos de potencia y la carga) pueden conectarse en delta, tal y como se muestra en la figura siguiente. Dado que la corriente de fase en un sistema trifásico normal es únicamente $\frac{1}{\sqrt{3}}$ de la corriente de línea, las especificaciones de corriente de los tiristores serían menores que si los tiristores (o los elementos de control) se colocaran en la línea.

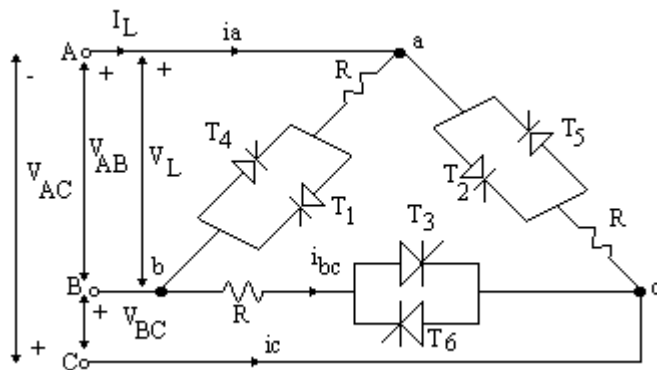


Figura. Controlador trifásico conectado en delta.

Debido a la conexión delta, las componentes armónicas múltiplos de 3 (es decir, aquellas de orden $n=3m$, donde m es un entero impar) de las corrientes de fase circularían alrededor de la delta y no aparecerían en la línea. Esto se debe a que las armónicas de secuencia cero están en fase en las tres fases de la carga.

Circuitos utilizados para controlar la velocidad de un motor de Inducción

El control de velocidad de motores desde hace tiempo dejó de ser exclusivo de motores de corriente directa y se aplicó a motores de corriente alterna. Sin embargo, la aparición de rectificadores controlados ha hecho que adquiera una mayor importancia en motores de corriente alterna; en motores de inducción se ha obtenido mediante el control de voltaje aplicado al estator o variando la resistencia en el rotor cuando es de tipo devanado, ambos procedimientos pueden ser logrados con el rectificador controlado.

Aplicación del rectificador controlado a motores de inducción.

El rectificador controlado se puede utilizar para el control del voltaje aplicado a las terminales del mismo, colocándolo en serie con las terminales del estator.

También puede ser utilizado en las terminales del rotor para controlar la corriente del mismo.

Operación del rectificador controlado.-

El funcionamiento del rectificador controlado es esencialmente el de un rectificador en el cual el comienzo de la conducción puede ser controlado mediante una señal de disparo pequeña alimentada a la rejilla. La conducción solo puede detenerse reduciendo la corriente a cero o a un nivel muy bajo. Cuando se utilizan estos dispositivos en corriente alterna, el cese de la conducción se obtiene fácilmente.

Existen muchos arreglos que se utilizan para el control de corriente alterna; entre otros están los mostrados en la figura siguiente: en el primero (a) solo hay conducción controlada durante medio ciclo, o sea que este arreglo sirve para la conversión de corriente alterna a directa, el segundo (b) conduce durante ambos medios ciclos pero solo existe conducción controlada durante uno de los medios ciclos y el los últimos dos (c) y (d) el control de la conducción es durante los dos medios ciclos.

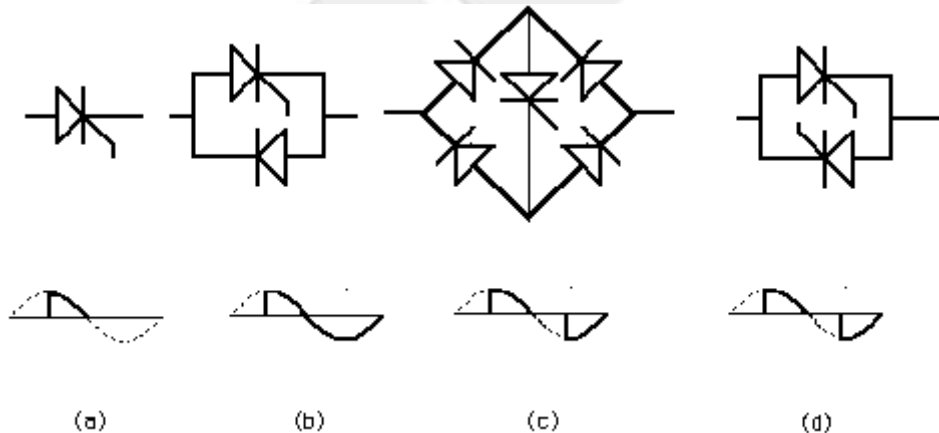
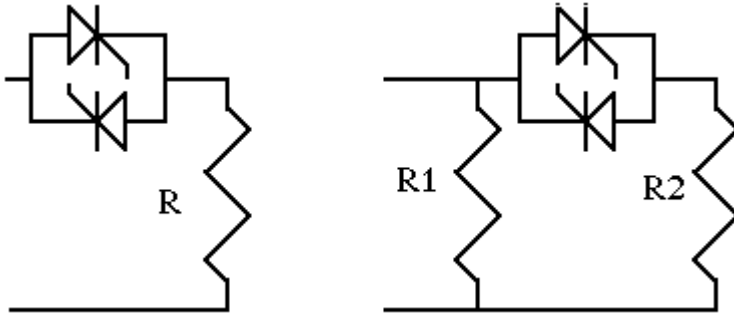


Figura. Arreglos para el control de velocidad

Control de resistencia con el rectificador controlado.-

Existen varios circuitos distintos que pueden utilizarse para el control de resistencia, entre los cuales se pueden considerar como típicos los mostrados en las figuras siguientes.



El circuito mostrado en la primera figura permite el control de la resistencia desde el valor infinito a un valor R, cuando los rectificadores no conducen y cuando conducen todo el tiempo respectivamente.

El circuito de la segunda figura antes mostrada permite el control de resistencia en un rango menor, es decir entre R1 y la combinación en paralelo de R1 y R2. Si $R2=0$, la variación será entre R1 y cero.

Características del voltaje del rotor.-

Una de las principales características que se encuentran en el rotor lo es el voltaje que se obtiene en terminales del mismo, en primer lugar la magnitud del voltaje y la frecuencia son variables, es decir al aumentar la velocidad, la magnitud del voltaje disminuye y a la vez también disminuye la frecuencia. Esto impone algunas restricciones en cuanto al circuito de disparo.

Otra de las características lo es la forma de onda, que no es una senoidal perfecta, sino que cuenta con una pequeña oscilación superpuesta (de mucho mayor frecuencia), debida a las ranuras presentes en el estator y el rotor que hacen que la reluctancia no sea constante al girar el rotor; estas oscilaciones hacen que los circuitos de disparo que dependen de esta forma de onda no produzcan conducción en forma simétrica.

Aplicación de los circuitos controladores de resistencia al rotor de un motor de inducción.-

Los circuitos mostrados en las figuras anteriores se pueden utilizar en el rotor, juntando tres semejantes para conectarlos en delta o estrella. Como generalmente en el rotor no se tiene disponible un neutro, es más práctico el circuito delta, ya que en el circuito estrella es necesario que dos rectificadores se encuentren en estado de conducción para que exista circulación de corriente.

El circuito formado por tres elementos del tipo mostrado en la primera figura tiene la ventaja de que el control de velocidad se logra desde cero a la máxima permitida por la resistencia R, arreglo bastante conveniente para evitar problemas de arranque del motor.

El circuito formado por tres elementos como los mostrados en la segunda figura hace posible la obtención de una mejor regulación de velocidad, sin embargo, no tiene la ventaja del circuito anterior en cuanto se refiere al arranque del motor.

Cuando los circuitos de disparo son alimentados por el voltaje que aparece a través de los rectificadores se obtiene un efecto de autorregulación muy conveniente. Esto se debe a que cuando aumenta la carga del motor la velocidad se reduce y al suceder esto el voltaje del rotor aumenta ocasionando que el disparo ocurra antes con la consiguiente reducción de las resistencia efectivas y la velocidad no disminuye tanto.

Circuitos de disparo.-

Hay una variedad muy grande de circuitos de disparo que se pueden utilizar; la selección de uno de ellos depende del trabajo a desarrollar por el motor de inducción en cuestión. Entre los más sencillos, puede citarse los formados por simple resistencias o combinaciones de resistencias y capacitancias como los mostrados en la figura siguiente.

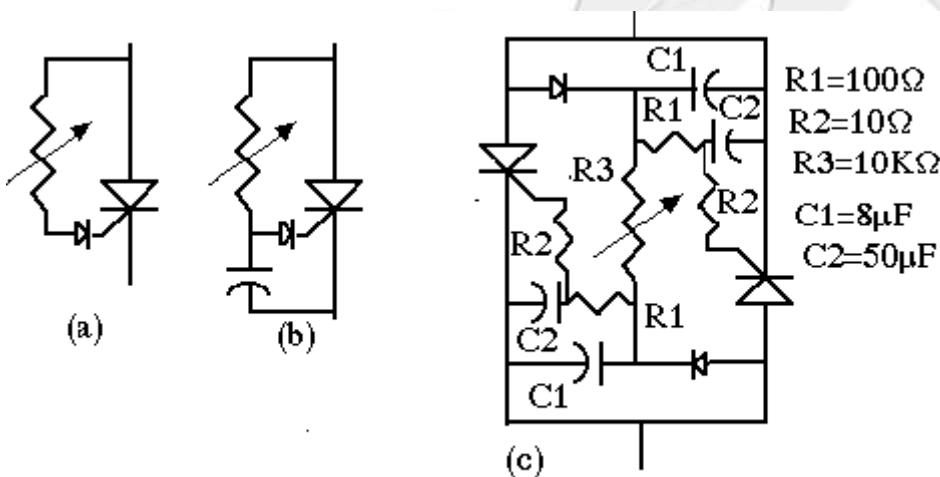


Figura. Circuitos de disparo

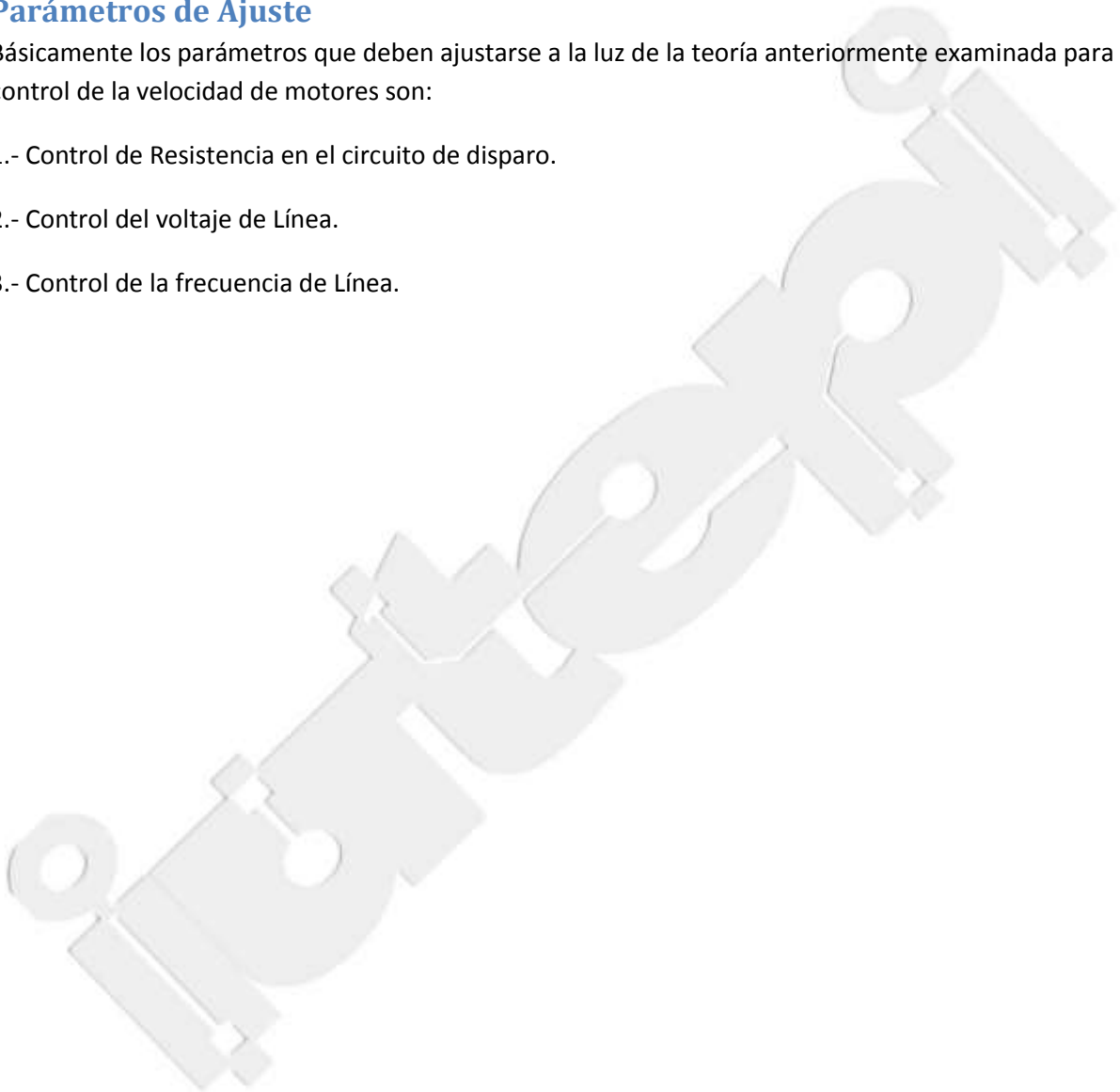
Durante el desarrollo de la experimentación se observó que los rectificadores controlados no disparaban en forma simétrica aun cuando se usaran en una fuente de frecuencia y voltaje constante. Esto se debe a que los rectificadores controlados no tienen características idénticas en las señales necesarias para iniciar la conducción. Para remediar esto en una región de control (por ejemplo el comienzo de la conducción) se pueden modificar ligeramente los valores de los elementos de los circuitos de disparo.

La figura c muestra el circuito de disparo utilizado durante la mayor parte de una larga investigación de científicos. Este circuito obtenido de un manual de Westinghouse tiene la ventaja de que se controla el disparo de dos rectificadores controlados con un solo potenciómetro.

Parámetros de Ajuste

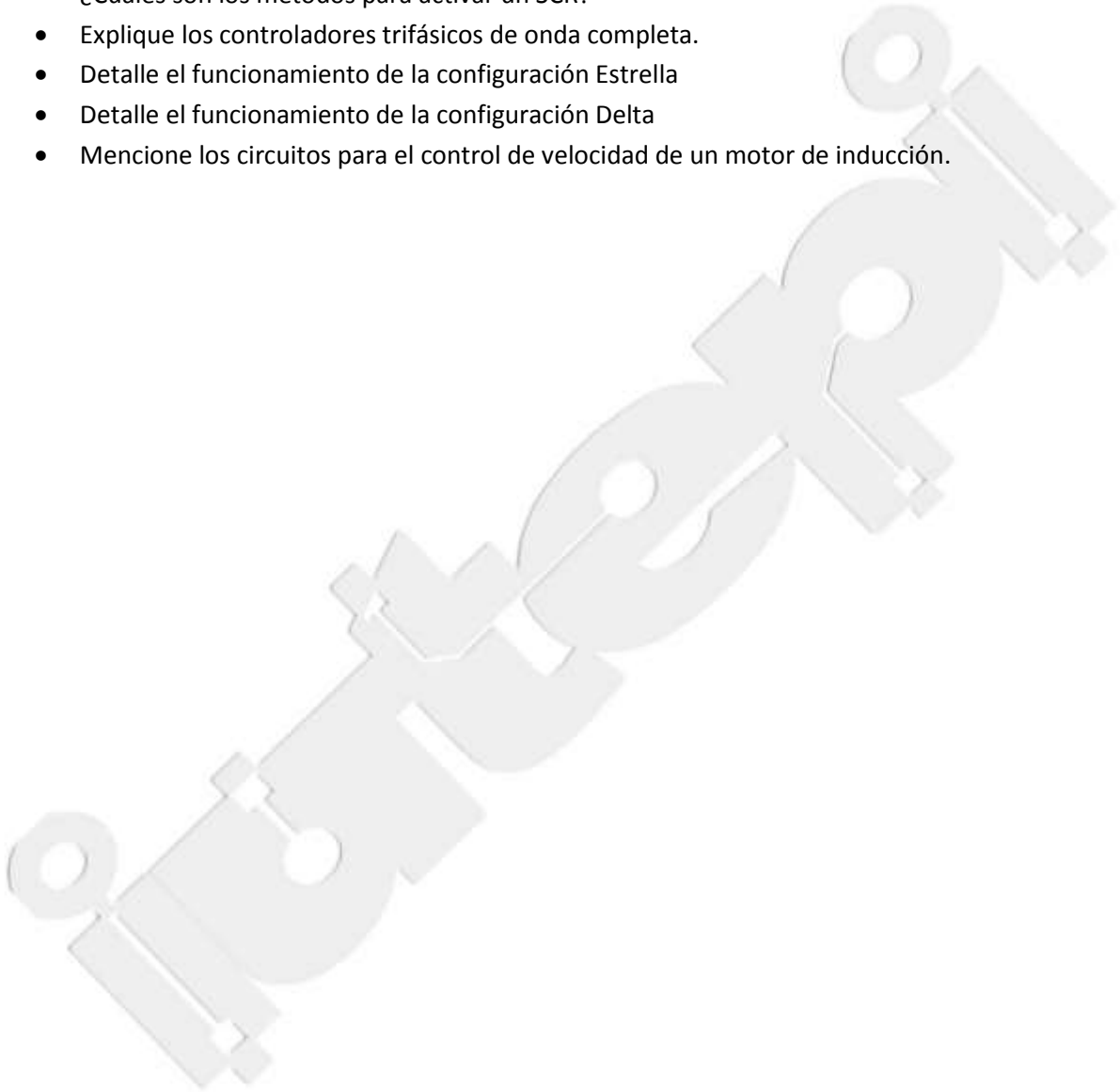
Básicamente los parámetros que deben ajustarse a la luz de la teoría anteriormente examinada para el control de la velocidad de motores son:

- 1.- Control de Resistencia en el circuito de disparo.
- 2.- Control del voltaje de Línea.
- 3.- Control de la frecuencia de Línea.



Autoevaluación

- Mencione y explique los tipos de controladores de voltaje AC
- Explique el principio de funcionamiento de los controladores monofásicos.
- ¿Cuáles son los métodos para activar un SCR?
- Explique los controladores trifásicos de onda completa.
- Detalle el funcionamiento de la configuración Estrella
- Detalle el funcionamiento de la configuración Delta
- Mencione los circuitos para el control de velocidad de un motor de inducción.



Circuitos de Regulación

Existen dos formas de controlar la velocidad en motores de corriente continua, alimentados por una tensión continua:

- 1.- Regulación mediante reóstatos.
- 2.- Regulación mediante recortadores o choppers.

Regulación mediante reóstatos

Consiste en una resistencia variable conectada en serie en el devanado de inducido. Esta resistencia provocará una caída de tensión en el inducido que hará que la fem del motor sea menor y, por tanto, se reduzca la velocidad.

Esta tecnología se utilizaba antes fundamentalmente en el arranque de motores, donde la intensidad de inducido es muy alta, para proteger a los circuitos y los devanados. Actualmente no se utiliza ya que, aunque es un control muy sencillo de la velocidad, está siempre disipando energía, por lo que el consumo eléctrico del motor es elevado incluso a velocidades bajas.

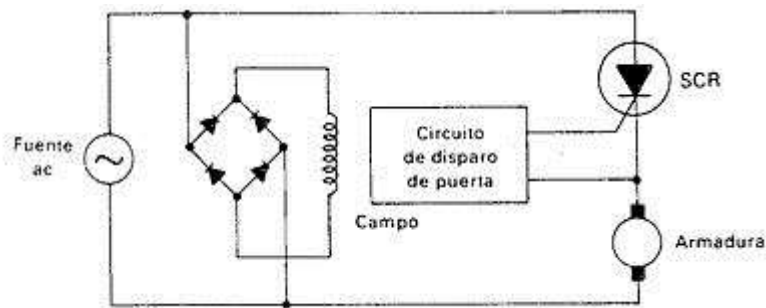
Regulación mediante Recortadores o choppers

Este sistema de regulación permite reducir el nivel de tensión directamente en corriente continua mediante unos dispositivos llamados recortadores o choppers. Estos elementos disponen de varios interruptores estáticos, que pueden ser dispositivos de electrónica de potencia como tiristores GTO, IGBT o Transistores Mosfet, y que permiten controlar en qué instantes de tiempos conducen o no la corriente a través del circuito.

Variando, por tanto, los tiempos de conexión y desconexión, se originará una señal de salida de forma cuadrada, de mayor o menor amplitud de pulso cuyo valor medio corresponde a la tensión de salida.

Circuitos de Disparo. Sincronismo. Modulación

En este caso el SCR (Silicone Controlled Rectifier) puede hacer la mayor parte de las funciones de un reóstato, en el control de la corriente promedio de una carga sin las limitaciones de gran potencia. Estos son pequeños, poco costosos y eficientes en energía. Es natural acoplar el motor para control de armadura para la velocidad del motor. Según la figura el SCR proporciona entonces rectificación de media onda y control al devanado de armadura. Si se da un temprano disparo del SCR, el voltaje y la corriente promedio de la armadura aumentan y el motor puede trabajar con más rapidez. Al disparar el SCR más tarde, se reducen el voltaje y la corriente promedio y el motor trabaja más lento.



Uso de un SCR para Control y regulación de velocidad de Motores DC.

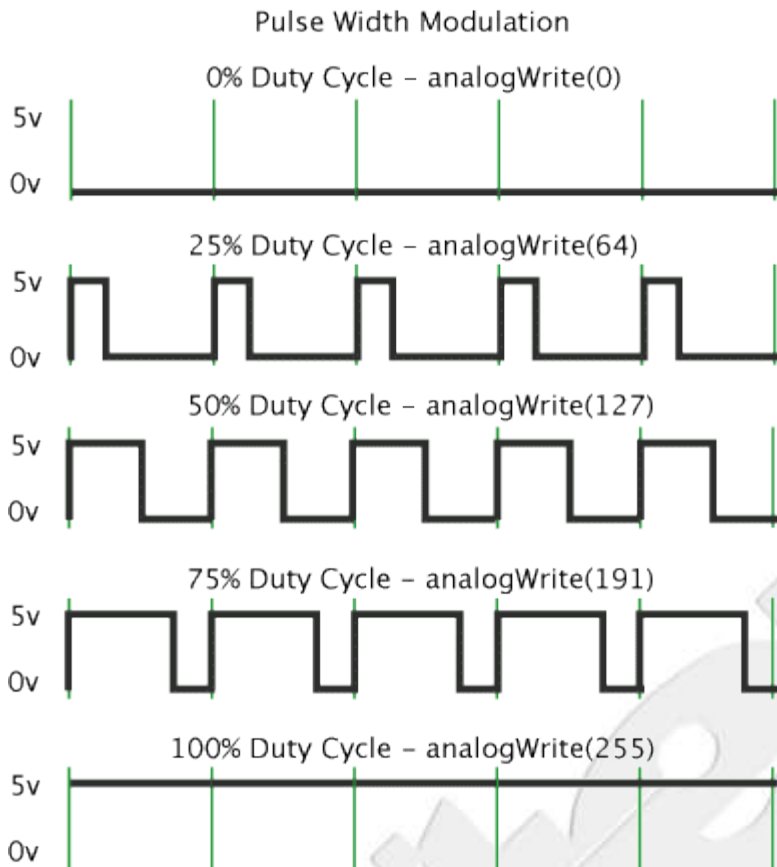
La Modulación por Ancho de Pulso (PWM o Pulse Width Modulation) es una forma muy eficaz de establecer cantidades intermedias de potencia eléctrica entre la máxima potencia y apagado. Una fuente de alimentación con un interruptor de alimentación simple proporciona potencia solo cuando está activado. El PWM es una técnica relativamente reciente que se ha podido realizar gracias a los modernos interruptores electrónicos de potencia. Una de las aplicaciones típicas del PWM: control de velocidad en motores eléctricos.

Durante casi un siglo algunos motores eléctricos de velocidad variable han tenido una eficiencia decente, pero eran más complejos que los motores de velocidad constantes. Estos motores requerían en ocasiones de un circuito eléctrico externo, como un banco de resistencias de potencia variable.

Sin embargo hay una gran necesidad de aplicación de potencia parcial en otros dispositivos, tales como estufas eléctricas, reguladores de luz de lámpara, y los servos de robótica. Un esquema PWM consiste básicamente en apagar y encender rápidamente el interruptor que permite el paso de energía. Por ejemplo: varias veces por minuto en una eléctrica estufa, 120 Hz en un regulador de luz, y así en las decenas o cientos de kHz en una fuente de alimentación (que tiene una salida regulada). Exceptuando el primero de los ejemplos anteriores (el de la estufa eléctrica cuya tasa de cambio es muy baja), la tasa de cambio de los restantes es tan elevada que la carga es incapaz de seguir dichas oscilaciones, y “ve” en cambio el valor medio de la misma.

La aplicación de la potencia máxima durante cortos periodos de tiempo -el intervalo del pulso en el que es aplicada- no causa ningún problema en la práctica. De hecho el PWM permite que se puedan aplicar potencias máximas superiores a las que se emplean cuando no se hace uso de un PWM, porque la carga a la que se le aplica esa potencia sufre dicho stress durante pequeños períodos, siempre que el valor medio que vea la carga sea inferior al permitido por el fabricante. El PWM puede ser muy práctico.

Se determina **ciclo de trabajo** al periodo de tiempo en cada intervalo en que el interruptor está encendido y la energía se están transmitiendo. Un ciclo de trabajo bajo corresponde a poca potencia, porque el interruptor está apagado durante la mayor parte del tiempo. El **ciclo de trabajo** se expresa en tanto por ciento, el 100% significa que trabajará a máxima potencia.



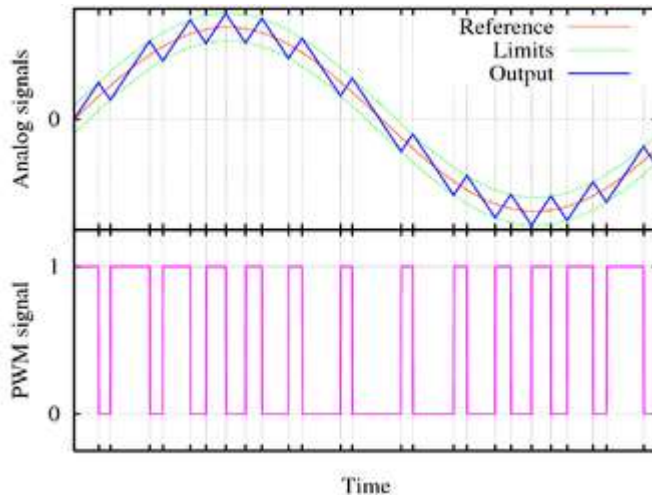
El duty cycle o ciclo de trabajo se expresa en tanto por ciento, representado que porcentaje de tiempo estará el interruptor encendido permitiendo el paso de energía.

El PWM funciona bien con controles digitales, ya que pueden configurar fácilmente el ciclo de trabajo dada su naturaleza de encendido/apagado.

El PWM de una señal o fuente de alimentación consiste en la modulación de su **ciclo de trabajo**, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o de controlar la cantidad de energía enviada a una carga.

El PWM usa una onda de pulso rectangular, cuyo ancho de pulso es modulado, dando como resultado la variación del valor medio de la forma de onda. Si consideramos una forma de onda de pulso $f(t)$ con un valor bajo y min, un valor alto y Max y un **ciclo de trabajo** D , el valor medio de la forma de onda es dado por la siguiente función:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt.$$

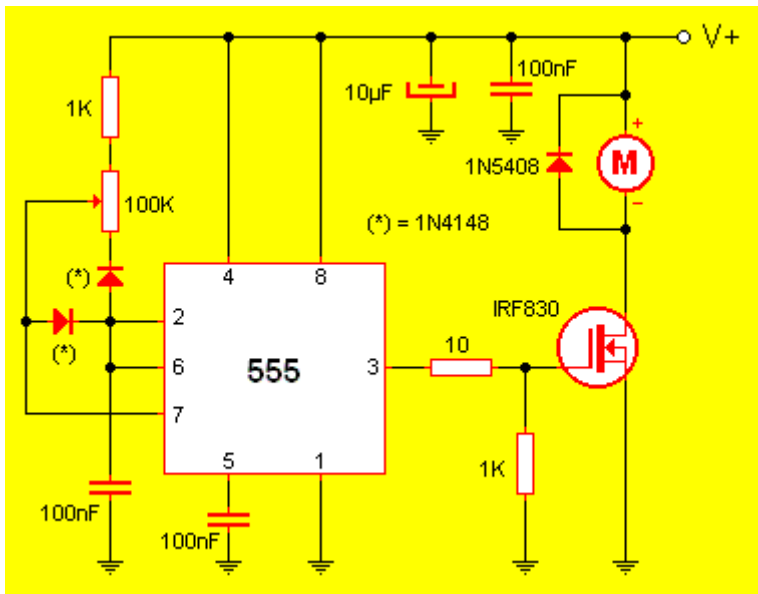


Circuitos Utilizados para Controlar la velocidad de Motores de Corriente Continua

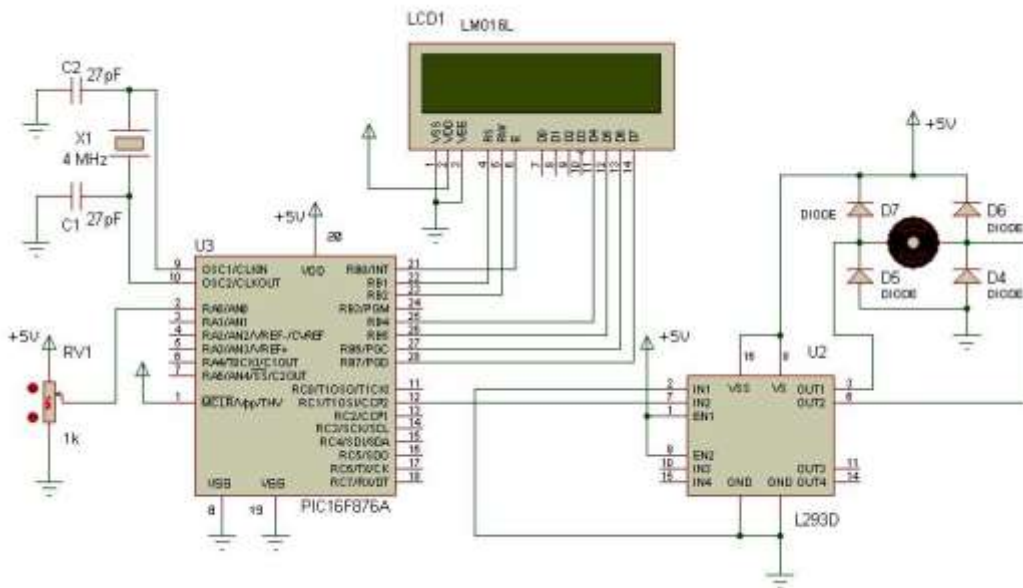
A continuación se muestra un circuito básico para el control de velocidad de un motor de DC basado en el método de la modulación por ancho de pulso (PWM) mencionada en tópicos anteriores.

Este circuito permite alterar la velocidad desde detenido hasta el máximo posible del motor por medio de un potenciómetro. Gracias a que funciona por modulación de ancho de pulso la fuerza del motor se ve poco afectada incluso a velocidades mínimas.

El circuito se basa en un integrado NE555 el cual genera el tren de impulsos necesario para controlar el transistor, el cual acciona por pulsos el motor de corriente continua. El diodo en paralelo con el motor impide que, cuando se quita la corriente, el transistor se quemé. Los componentes entre los terminales 2, 6 y 7 del integrado regulan la frecuencia de oscilación del circuito y, por ende, la velocidad del motor. El transistor, con un buen disipador de calor, puede manejar hasta 75W de potencia.



A continuación se muestra otro circuito ahora incorporando un PIC para un control más preciso.

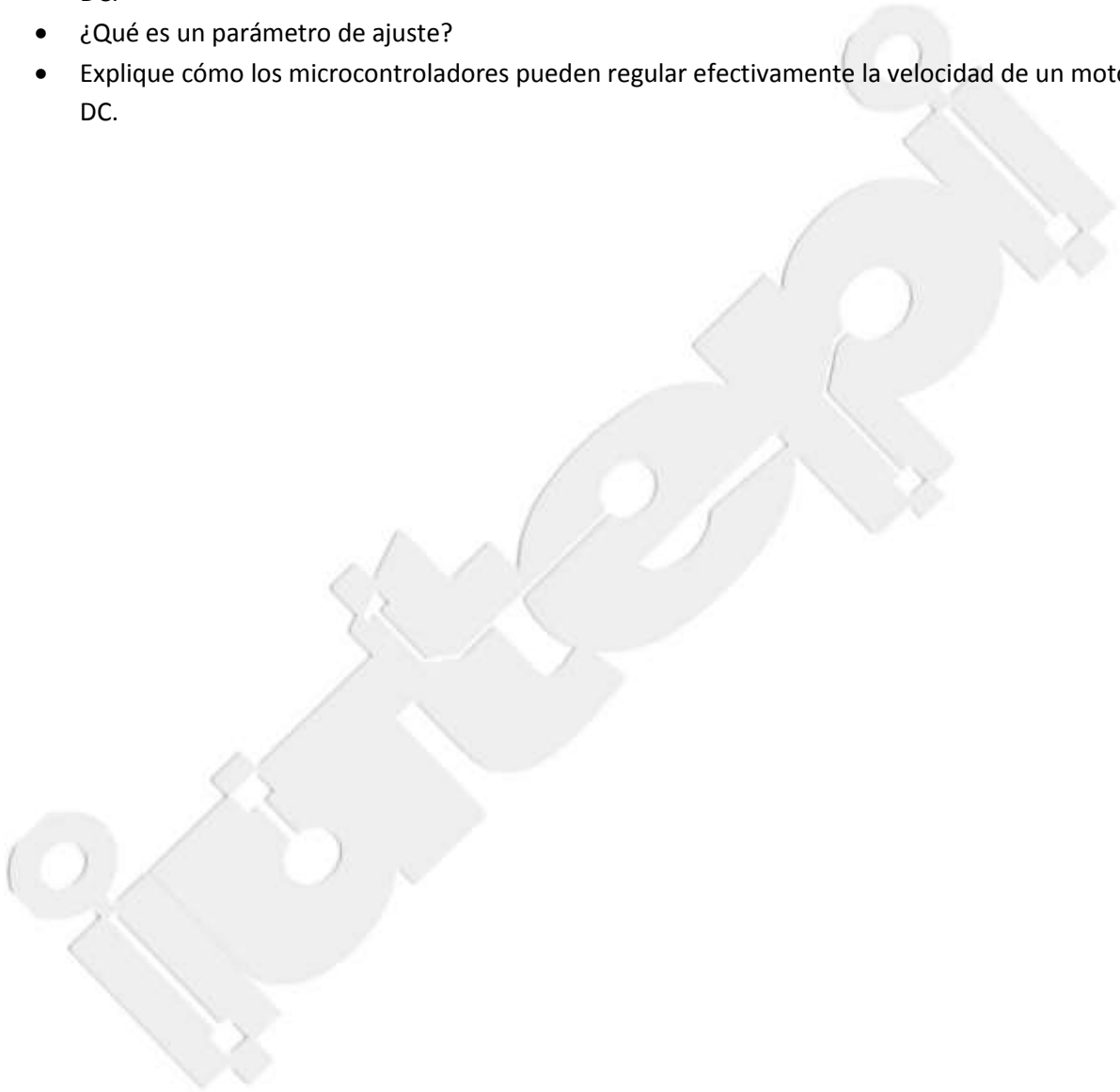


Parámetros de Ajuste

En la mayoría de los casos el parámetro de ajuste es el potenciómetro mediante el cual se ajusta la velocidad de los motores de forma práctica y sencilla.

Autoevaluación

- Explique que son los circuitos de disparo y sincronismo.
- Explique cómo funcionan por lo menos dos circuitos para el control de velocidad de un motor en DC.
- ¿Qué es un parámetro de ajuste?
- Explique cómo los microcontroladores pueden regular efectivamente la velocidad de un motor DC.



Conclusión

La tecnología que se ha integrado al proceso educativo está cambiando los paradigmas de enseñanza. Los cambios son en términos generales, buenos. Gracias a la tecnología los libros también están cambiando. Los estudiantes ya no tienen que cargar todos los libros. Sacar copia del libro es algo raro, y el hecho de no tener que comprar cientos de libros en papel, y dejar que acumulen polvo en los anaqueles, es un beneficio económico para los institutos de educación.

Se espera que el presente ebook sirva de material complementario a los estudiantes de la materia Electrónica Industrial, para así comprender más a cabalidad los tópicos que el programa estipula.



Bibliografía

- <http://proton.ucting.udg.mx/temas/circuitos/omar/Omar.htm>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Rectificador_controlado_de_silicio
- http://www.viasatelital.com/proyectos_electronicos/scr.htm
- http://www.unicrom.com/Tut_scr.asp
- Control de velocidad de motores de inducción de rotor devanado mediante el uso de rectificadores controlados. Ing. Javier Rodríguez Bailey. ITESM Septiembre 2006.

- Electrónica de Potencia. Ed. Paraninfo, 1995.
- Dispositivos Electrónicos de Potencia. Tiristores, TRIACs y GTO. Ed. Paraninfo, 1996.
- Tiristores y triacs. Ed. Marcombo, 1992.
- RASHID, M. “Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones”. Ed. Prentice Hall.
-
- GUALDA, J.A.; MARTINEZ, S.; MARTINEZ, P. “Electrónica Industrial: Técnicas de Potencia”. Ed. Marcombo.