SÍNTESIS

Este trabajo está destinado a estandarizar el material para la impartición de las clases de electrónica industrial y/o de potencia, debido a la gran cantidad de material existente en éstas materias.

En el capitulo 1 se dá una explicación *grosso modo* de los objetivos que éste trabajo trata de cubrir, así mismo como su justificación para realizarse.

Dentro del capitulo 2 se empieza con el material que se va a utilizar para la impartición de clases, empezando con los antecedentes de la electrónica de potencia, donde nos muestra la evolución por la que ha pasado la electrónica de potencia; los diferentes tipos de dispositivos que existen, así como unas diapositivas de las mismas; la operación y aplicaciones de los dispositivos que existen y diapositivas que muestran el símbolo, el tipo de señal que genera y sus aplicaciones.

Después se profundiza más en lo que son los diodos de potencia; mostrándonos sus características y clasificación, incluyendo diapositivas y problemas propuestos, aparte de aplicaciones con diodos conectados en serie o paralelo con problemas propuestos sobre este tema.

Otro tema que se aborda dentro de este capítulo son los diodos rectificados; aquí nos muestra a los diodos con carga, los diodos trabajando en marcha libre, los parámetros de rendimiento, la rectificación de media onda y onda completa con carga resistiva con CA y CA trifásica, los efectos de las cargas LC y filtros, con diapositivas con sus características y problemas ejemplo.

Dentro de este capitulo también se ve lo que son los Tiristores; aquí se ven las características, los tipos de activación y circuitos de activación de los SCR, en serie y paralelo y su protección entre transitorios, otros tiristores similares al SCR y elementos que generan señal para la activación de los tiristores; aquí se incluyen diapositivas de cada uno de estos temas relacionados para una mejor compresión de este tema.

Más adelante se toma el tema de los convertidores; en este tema se ve lo que son la clasificación y consideraciones, otros tiristores y circuitos de control; en este tema se muestran diapositivas con las características de los convertidores.

El tema final del capitulo 2 son los troceadores o convertidores de CD a CD; la finalidad de estos es convertir el voltaje ya sea elevando o disminuyéndolo, y la operación y clasificación de estos, como apoyo se utilizan diapositivas de los diferentes tipos de troceadores.

En el capitulo 3 nos habla de lo que son las aplicaciones industriales, aquí encontramos los interruptores estáticos, los propulsores de corriente directa, las fuentes de poder y propulsores de corriente alterna, con diapositivas de los circuitos y sus características.

Dentro del capitulo 4 encontramos lo que es material de apoyo, que es una base de datos de problemas y preguntas, aparte de referencias bibliográficas de paginas en la internet y programas para simulación en C++, MATLAB y PSPICE.

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema a resolver

Diferencias en materiales de apoyo para la impartición de la cátedra, no se dispone de información y de material recopilado. Los maestros de reciente ingreso no disponen de una base de información.

1.2 Objetivo

La elaboración del material de apoyo para electrónica industrial y/o de potencia de diferentes tipos, como son bibliografía de libros, circuitos electrónicos y revistas, direcciones de Internet, programas para operar con software de simulación en algunos diseños de proyectos académicos.

1.3 Hipótesis

En la actualidad se presentan algunas diferencias en el material de apoyo utilizado para la cátedra ya sea porque no se cuenta con información o de algunos otros recursos necesarios para esto.

1.4 Justificación

Actualmente los instructores no disponen del mismo material de apoyo para la impartición de la cátedra en la materia electrónica de potencia y/o industrial, lo cual hace que ésta no sea uniforme en todos los grupos de clase.

Una solución a esto es el **Diseño de material didáctico para Electrónica Industrial y de Potencia**, que permitirá uniformizar los conocimientos impartidos a nuestros alumnos utilizando un mismo material de apoyo.

1.5 Límites

Se diseñará material didáctico para Electrónica Industrial y de Potencia, listado de programas de software, diseño de circuitos electrónicos, listado de textos de consulta, suscripciones posibles de revistas de la especialidad y direcciones de Internet para consulta o investigación.

1.6 Metodología

La metodología que se propone llevar es:

1. Se adquirirá toda la información relacionada con el curso de electrónica industrial y/o de potencia; tal como la lista de textos de consulta de la especialidad, el software, la información de las revistas en las que se puede suscribir y las direcciones de Internet para consulta o investigaciones.

2. Se seleccionará el material adquirido, organizándolo de acuerdo al programa del curso, para posteriormente clasificarlo y adecuarlo.

3. Desarrollo y prueba de simulaciones que están consideradas dentro del programa de los cursos.

4. Desarrollo de la tesis de acuerdo a toda la información recopilada y validada.

1.7 Revisión Bibliográfica

El texto **tiristores y triacs**, cuenta con la información necesaria para comprender la operación y algunas aplicaciones de los triacs y los SCR, pero no cuenta con los cálculos tan detallados como en otros textos.

El texto **Electrónica Industrial Moderna** comprende gran cantidad de temas de los cuales buena parte de estos no se ven con la profundidad necesaria para un buen análisis de diseño, pero si se cuenta con los suficientes datos para desarrollar los proyectos que plantea el texto.

El texto **Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones** es un buen texto y tiene buenos cálculos, y hace algunos análisis de diseño, pero casi nunca plantea un circuito completo, mas que solo a bloques y esto, considero que limita mucho la comprensión del mismo.

El texto **Introduction to Solid State Power Electronics** presenta la información de una forma muy básica pero comprensible lo cual permite un claro entendimiento de los semiconductores de potencia, su deficiencia consiste en que cuenta con pocos cálculos y circuitos de aplicación.

El texto **Motorola Thyristors Data** como su titulo lo indica es información de los componentes de potencia, pero también cuenta con circuitos de aplicación claramente explicados y con datos y cálculos mínimos necesarios para poder reproducir los circuitos que ahí explica.

El texto **Thyristors Product Catalog** presenta la información mínima para comprender los elementos de potencia SCR y triacs, así como algunos elementos para la activación de los dispositivos de potencia, otro de los puntos que trata este texto es la operación y manejo de equipo con procedimientos de seguridad para evitar accidentes.

El texto **Adjustable Speed Drives AC y DC** presenta la información de selección, operación, aplicación e información técnica, esta ultima de forma muy ordenada y completa de la manera en que funciona los controladores de los motores de CA y CD.

El texto **Fundamentals of Power Electronics** nos da un claro panorama de los pulsadores o troceadores o choppers o reguladores de CD y presenta un análisis muy detallado del principio de operación, su clasificación, calculo de protecciones, calculo de diseño y consideraciones para una buena aplicación, se considera un libro muy completo en esta área.

El texto **Integrated Solid State Devices and Circuits** plantea muy claros objetivos a cubrir para la comprensión de la electrónica de componentes, lo cual se considera que deberían tener los alumnos antes de tomar el curso de electrónica de potencia o industrial.

En el diseño del material didáctico se tomó en cuenta la información de los diferentes textos tomando las ideas del orden que debería llevar y ayudan en gran medida a comprender un poco más cada uno de los textos de la bibliografía, los cuales al inicio de esta revisión bibliográfica se explicó cada uno de sus puntos más importantes y a continuación explico en qué me ayudo cada uno de los textos:

- Tiristores y triacs me ayudo a una comprensión básica y análisis de diferentes circuitos básicos.
- Electrónica industrial moderna me permitió comprender aplicaciones básicas, cálculos básicos y desarrollo de proyectos funcionales.

- Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones es el libro de texto que llevamos en clase, el cual cuenta con gran cantidad de información para cálculos diversos y algunos análisis.
- Introduction to Solid State Power Electronics las ideas que se tomaron de aquí es la forma de explicar en forma sencilla y bien definida.
- Motorola Thyristors Data nos permite tener un mayor análisis en los circuitos y en las hojas de datos de los diferentes tipos de componentes.
- Thyristors Product Catalog permite hacer análisis de circuitos sencillos, pero no por ello menos importante para una buena comprensión de la electrónica de potencia.
- Adjustable Speed Drives AC y DC me permitió comprender mejor los pulsadores y todo el análisis, calculo y selección de protecciones en estos elementos para poder seleccionar el material adecuado para este trabajo.
- Fundamentals of Power Electronics este texto tiene la ventaja de disponer de lo necesario para ser utilizado como libro de consulta de maestros o de alumnos para apoyo de la clase y también tome ideas de este para el diseño del material didáctico.

2. TEMAS DEL CURSO

2.1 Antecedentes

La potencia eléctrica durante mucho tiempo se controló con diferentes dispositivos, pero las tendencias a tener una mayor eficiencia nos ha llevado por diferentes caminos que nos han permitido obtenerla a través de la **Electrónica de Potencia**, que en la actualidad la mayor parte de estos componentes tienden a ser de estado sólido, pero sin dejar de utilizar los elementos básicos de la electrónica tales como resistencia, capacitancia e inductancia, que es necesario que se comprendan completamente para una buena implementación de los sistemas que se desarrollen.

La electrónica de potencia siempre va en conjunto de tres áreas cómo son: los elementos de potencia, la electrónica de dispositivos y el control, los cuales se encuentran interrelacionados. Un punto que siempre deberemos recordar es que estos dispositivos tienen una sección donde manejan muy baja potencia alrededor de miliwats o escasos wats que corresponde a la parte de control y otra donde manejan alta potencia que por lo regular es de miles de wats a millones de wats, que corresponde a la parte de potencia

2.1.1 Historia de la electrónica de potencia

La historia podemos comentarla de diferentes puntos de vista pero al analizarla desde el punto de vista cronológico y remarcando los avances es posible ubicarla mejor. Así es que empieza a inicios del siglo pasado cuando se empieza a rectificar corriente eléctrica a través del arco de mercurio, después a mediados del siglo veinte se aplican para el control de la energía: el rectificador de tubo al alto vacío de rejilla controlada, el ignitrón, el fanotrón y tiratrón. Aunque en el año de 1948 los investigadores de Bell Telephone Laboratories inventan el transistor no es hasta 1956 cuando desarrollan el transistor PNPN que se definió como tiristor o rectificador controlado de silicio " SCR " y General Electric inicia su producción comercialmente. Después de ésto se han desarrollado una gran variedad de dispositivos con características mejores cada día y también la electrónica de componentes o dispositivos. En aquellos años el control se encontraba frenado por no disponer de equipos que pudieran procesar gran cantidad de funciones así es que al disponerse posteriormente de todas estas capacidades en los últimos treinta años del siglo veinte. En la siguiente figura se muestra en forma gráfica estos avances.

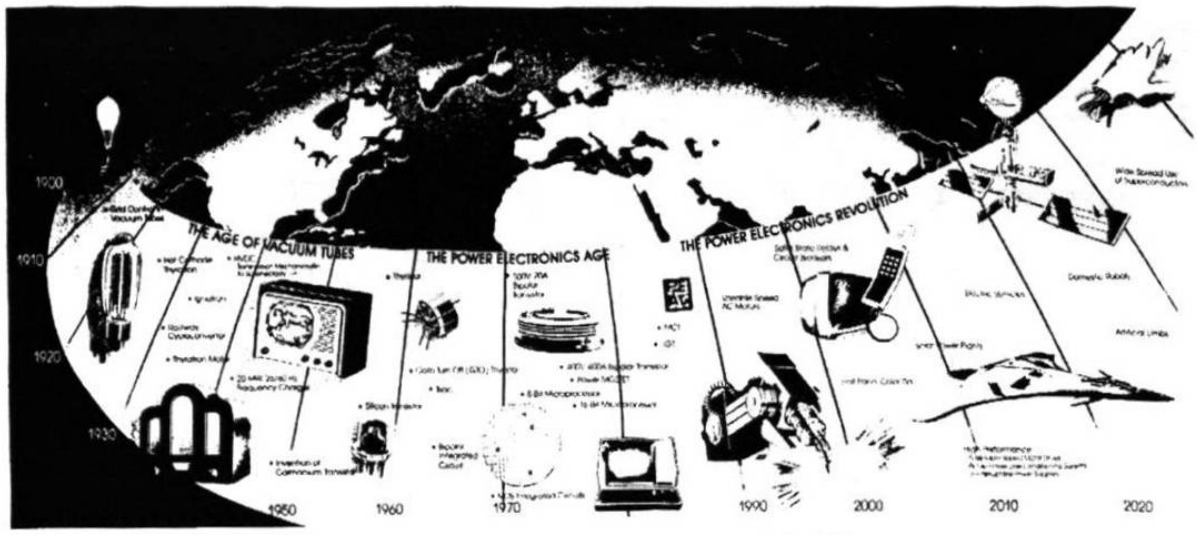


Figura 2.1.1 Historia de la electrónica de Potencia

2.1.2 Dispositivos semiconductores de potencia

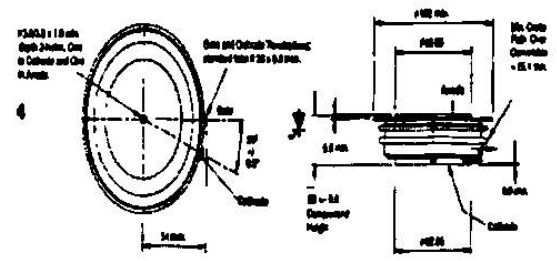
Podríamos hacer diferentes clasificaciones para comprender y ubicar rápidamente las funciones de los elementos de potencia, pero esto se les puede dejar de tarea a los alumnos para que practiquen y obtengan una mejor comprensión de cada uno de los elementos de potencia. Por lo tanto, se explicará las características de cada uno de los elementos de potencia tales como: potencia que pueden manejar, niveles de corriente, niveles de voltaje, niveles de frecuencia, resistencia en estado de conducción de los dispositivos, tipo de señal que reciben en su compuerta y el tipo de corriente si es alterna o directa la que pueden manejar o ambas, entre ánodo-cátodo o colector-emisor o drenador-surtidor dependiendo el tipo de componente que sea.

Las siguientes figuras son para mostrar que tipo de presentación tienen.

Figura 2.1.2 Tipos de SCRs

Figura 2.1.3 Tipo de SCR de Potencia

Figura 2.1.4 Otros Tipos



Dimensiones 1

Figura 2.1.5

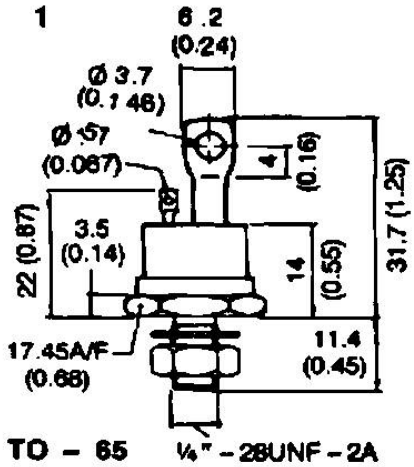


Figura 2.1.6 Dimensiones 2

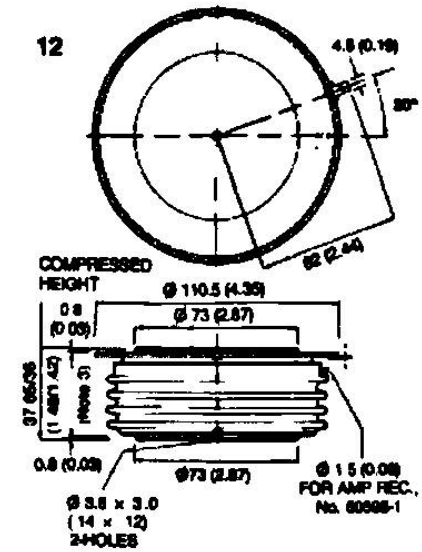


Figura 2.1.7 Dimensiones 3

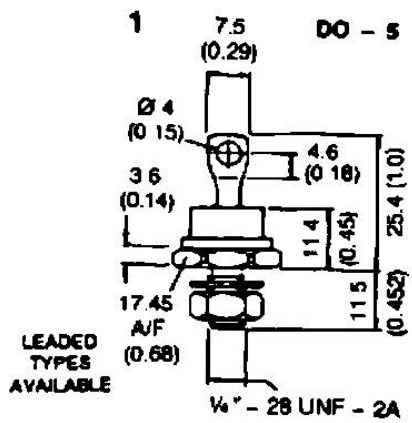


Figura 2.1.8 Dimensiones 4

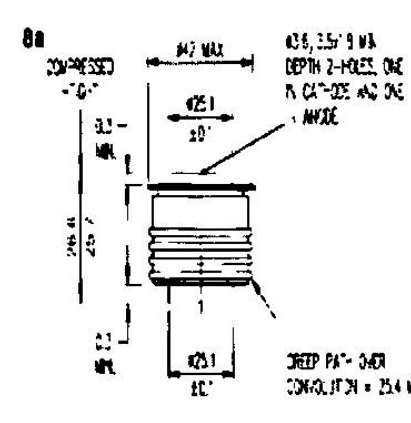


Figura 2.1.9 Dimensiones 5

2.1.3 Operación y aplicaciones de los dispositivos de potencia

Los dispositivos de potencia operan de diferentes formas y con diferentes tipos de señal, por lo que a continuación se muestran circuitos sencillos con sus curvas características de voltaje contra corriente de cada componente correspondientes para que se capte fácilmente su operación. Aquí se agrupan los componentes de potencia en función del tipo de corriente que manejan ya sea alterna o directa.

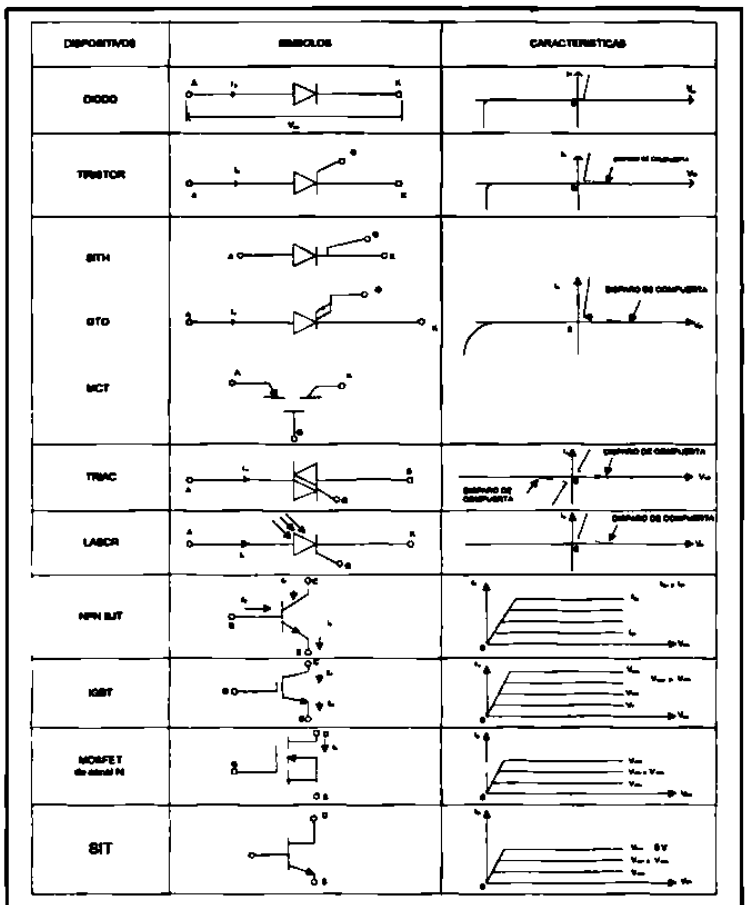


Tabla 2.1.10 Elementos

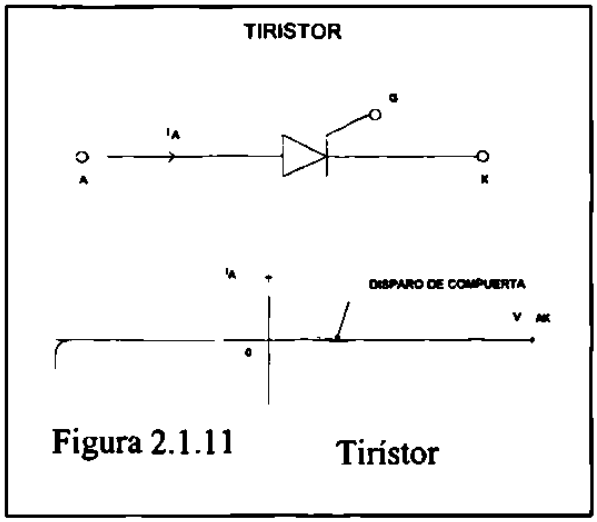


Figura 2.1.11 Tiristor

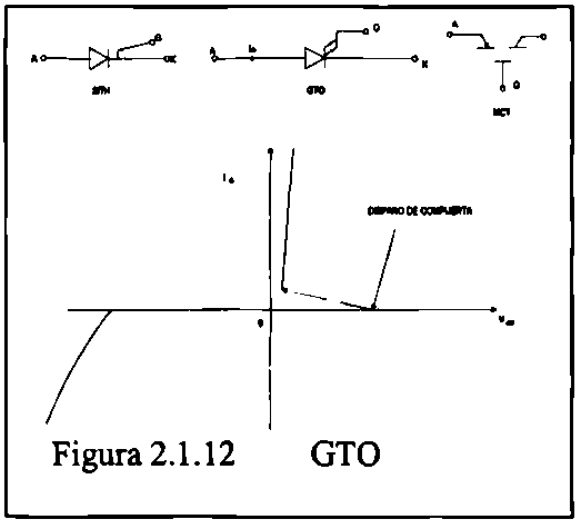


Figura 2.1.12 GTO

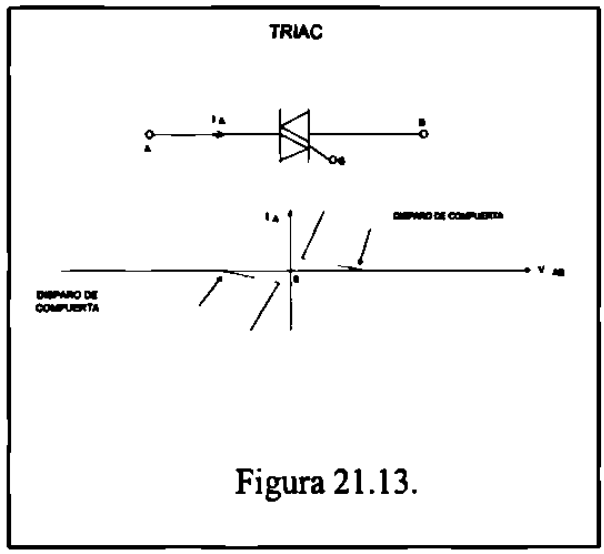


Figura 21.13.

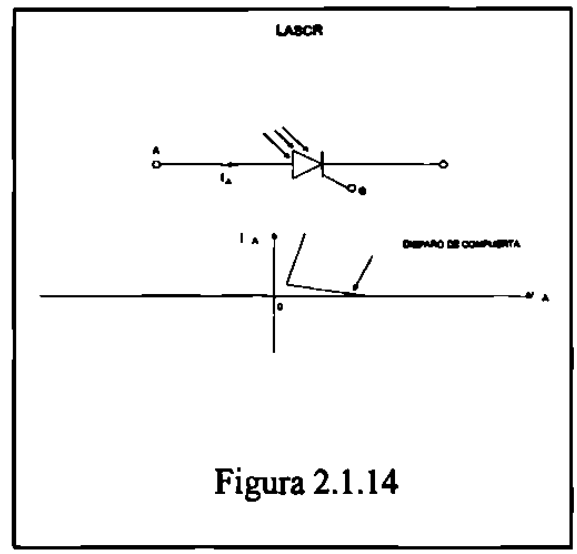


Figura 2.1.14

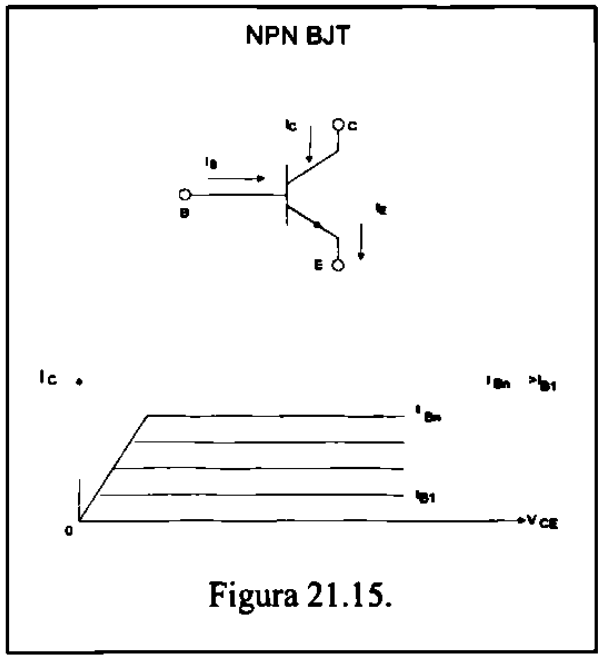


Figura 21.15.

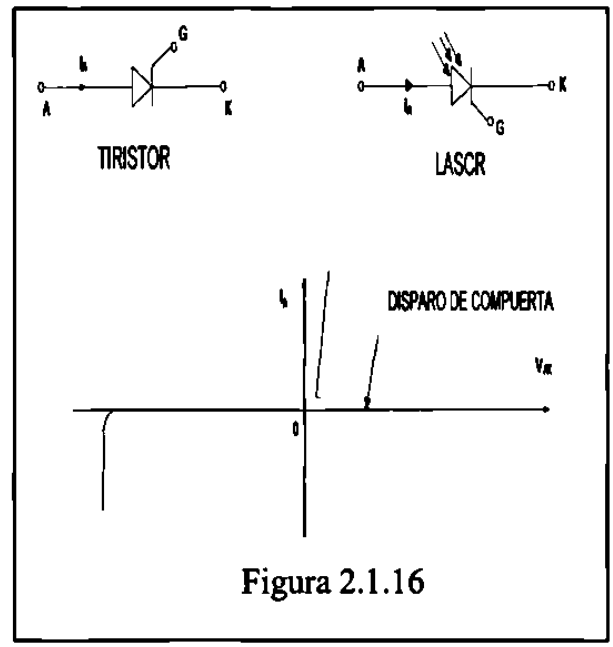


Figura 2.1.16

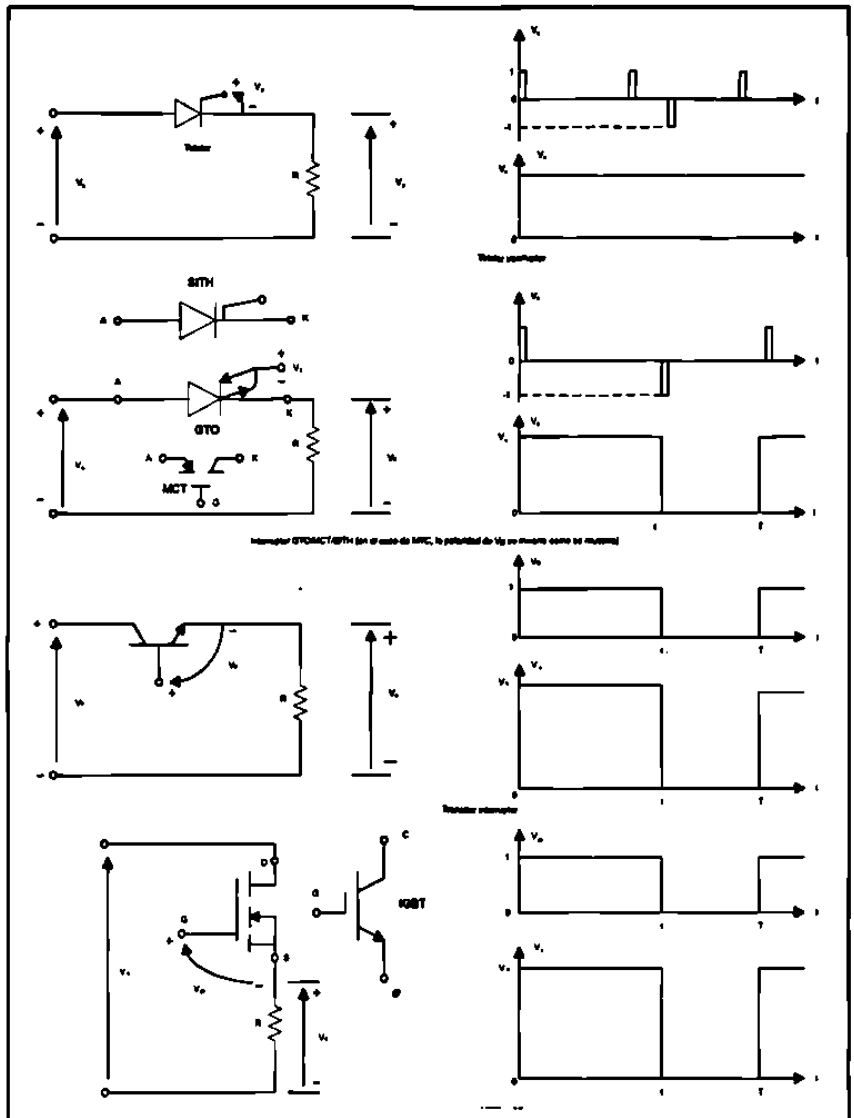


Figura 2.1.17 Clasificación de elementos de potencia

Las aplicaciones dentro de la vida diaria en las diferentes áreas de utilización como son: la industrial, la comercial, doméstica, etcétera. Podemos apreciarlo en el siguiente listado y gráfico.

Tabla 2.1.18

Aplicaciones

Capacitores de estado sólido	Fuentes de alimentación para radar sonar
Abre puertas eléctricos	Tránsito masivo
Acondicionamiento del aire	Minería
Alarmas	Control de hornos
Alarmas contra robo	Controles de motor
Amplificadores de audio	Circuito de televisión
Arrancadores para turbinas de gas	Fuentes de alimentación
Atenuadores	Compensación de volumenes
Atenuadores longitudinal	Refinamiento de pozos petroleros
Cálidos	Generadores ultrasónicos
Calefacción por inducción	Propulsores motores
Cargador de batería	Máquinas dispensadoras automáticas
Conmutadores luminosos	Interruptores eléctricos
Circuitos para cohetes alimentados	Bombas y compresores
Cobros eléctricos	Fotógrafo
Computadoras	Fotocopiadoras
Conductores	Controles de vehículo de vehículo
Controles de calor	Transmisores de muy baja frecuencia
Controles basados de motor de	Deflectores de televisión
Bifurcación directa de alto voltaje (HVDC)	Trenes de humanoides
Cruceros	Sistemas de seguridad
Electrofisiología electromagnéticos	Tomas magnetos
Electrodomésticos	Amplificadores de radio frecuencia
Electrovoltaicos	Fuentes de alimentación de energía solar
Elevadores	Rebarredores eléctricos
Esfinadores	Controles de temperatura
Excitadores de generador	Frenos de suspensión
Exciladores	Balasteros para lámpara de arco de mercurio o
Fuentes de alimentación para aeronaves	Fuentes de alimentación no interrumpibles
Fuentes de alimentación para Hear	Soldadores
Grabaciones magnéticas	Material fotográfico
Orbitas y teatros	Lavadoras
Herramientas eléctricas	Imanes
Herramientas manuales de potencia	Producción de papel
Hornos de calentamiento	Sistemas navíos
Ignición electrónica	Trenes
Iluminación de alta frecuencia	Armazón de máquinas electrónicas
Juegos	Proyectores de cine
Lanzadores	Reguladores de voltaje
Locomotoras	Fuentes de poder para quirúrgicos alas
Machacadores de alimento	Equipamientos
Molinos	Máquinas de coser
Precipitadores electrostáticos	Aceleradores de partículas
Procesos químicos	Magnetos o electroimanes
Publicidad	Filtros eléctricos
Puertas de cochera automáticas	Relevadores de estado sólido
Pulsador	Aspiradores de vacío
Relevadores de seguridad	Transportadores de personas
Secadores de ropa	Unidad superficial de mango
Secadores eléctricos	Horno de control de motor cochera
Sopladores	Reguladores

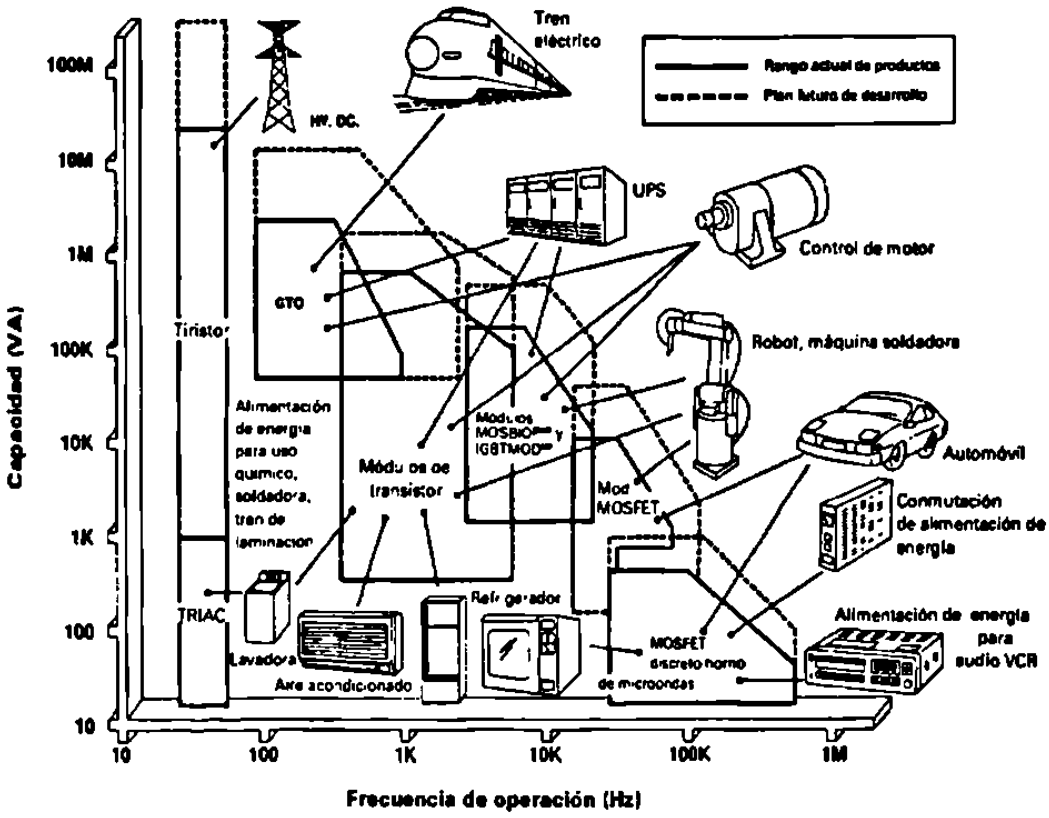


Figura 2.1.18-6 Aplicaciones de los dispositivos de potencia. (Cortesía de Powerex, Inc.)

Para el manejo de la energía eléctrica es necesario el acondicionamiento de la misma, por lo que es necesario la conversión de la potencia eléctrica de una forma a otra, ya sea de C.A. a CD o CD a CA. La conversión se logra con el switcheo correspondiente de los elementos de potencia y de acuerdo al circuito de conversión podemos clasificar parcialmente de la forma siguiente:

- Convertidores de CA-CD { Controlados / No controlados }
- Convertidores de CA-CA
- Convertidores de CD-CD
- Convertidores de CD-CA
- Interruptores estáticos

A continuación se presentan las filminas reducidas o figuras para acetatos que nos muestran los circuitos simplificados.

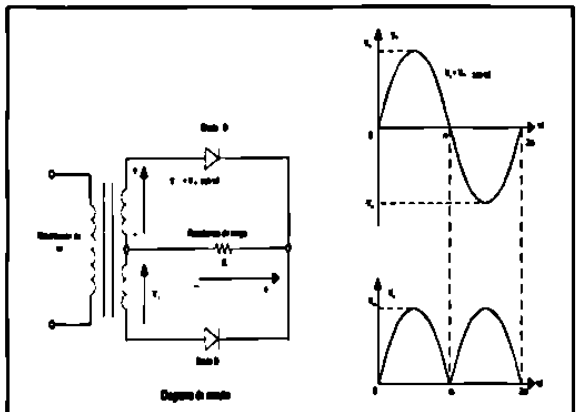


Figura 2.1.19 Aplicación 1

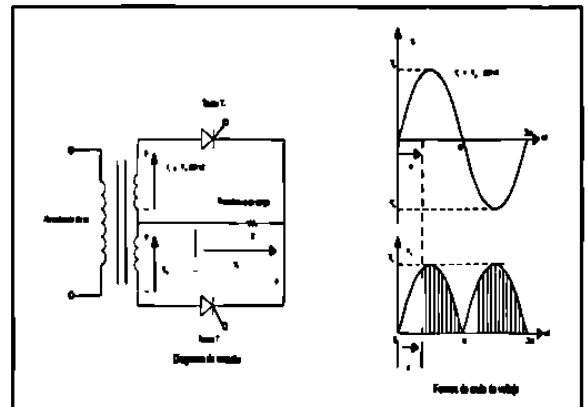


Figura 2.1.20 Aplicación 2

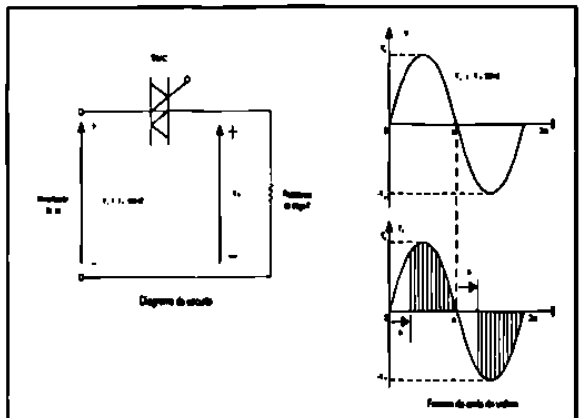


Figura 2.1.21 Aplicación 3

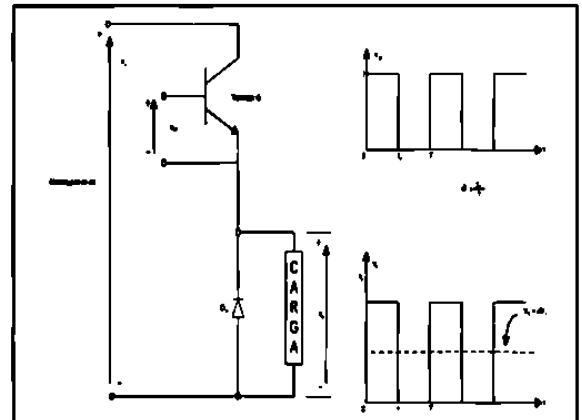


Figura 2.1.22 Aplicación 4

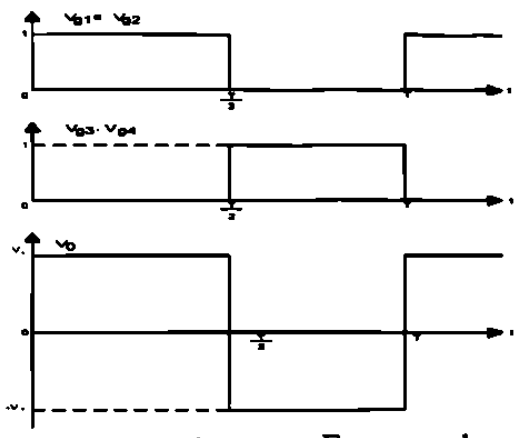


Figura 2.1.23 Forma onda

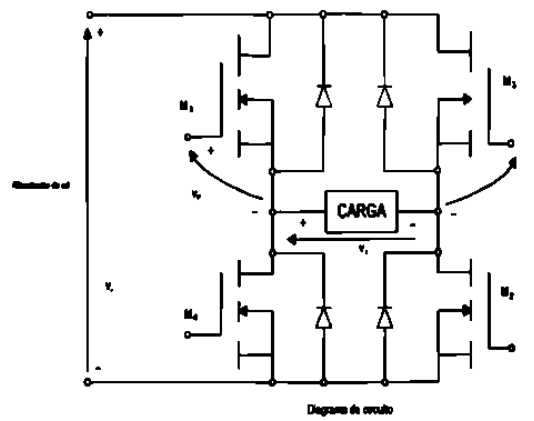


Figura 2.1.24 Aplicación 5

Ventajas y Desventajas de la aplicación de elementos de potencia en circuitos de switcheo. Así como presentan una serie de ventajas que nos ayudan a un mejor control de la potencia eléctrica tales como:

- Manejo de grandes cantidades de potencia
- Poco peso (ligero) y dimensiones
- Confiable (seguro)
- Gran rapidez en el apagado
- Necesita mínima potencia para el encendido
- No tiene partes móviles

También muestra a algunas desventajas de las que no debemos descuidar tales como:

- Caída de 1.5 volts en estado de encendido
- Limitación térmica debido a su dimensión
- Es necesario protegerlo contra transitorios
- Difícil de desactivar
- Generación e introducción de armónicos de corriente (I) o voltaje (V) en el sistema de alimentación y en la salida de los convertidores

Esto ocasiona una interferencia en diferentes equipos y para evitar estas interferencias es necesario aplicar filtros para eliminarlos.
A continuación se muestra un diagrama de bloques de un convertidor con algunas protecciones.

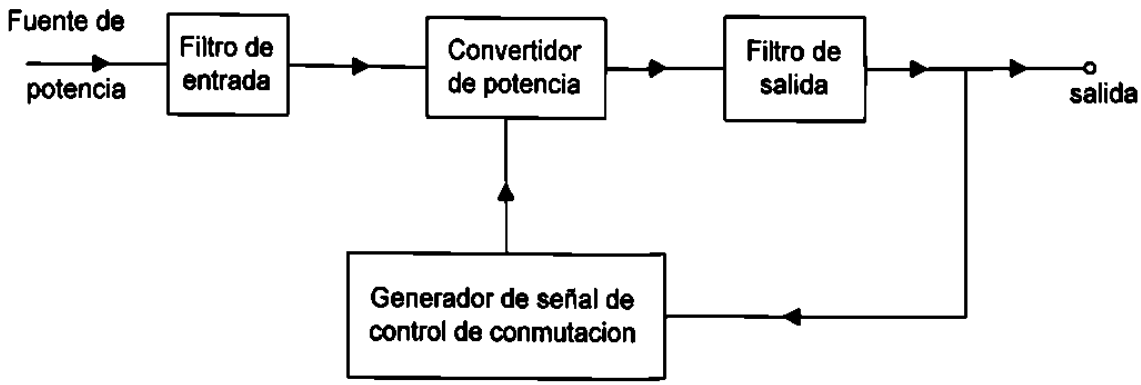


Figura 2.1.25 Diagrama a bloques para convertidor de potencia

2.2 Diodos de Potencia

2.2.1 Antecedentes

Los diodos de potencia tienden a cambiar el comportamiento en sus características o parámetros dependiendo en gran medida de la cantidad de corriente a manejar, por esta razón, hay mucha diferencia de las condiciones ideales con que realizamos nuestros cálculos; así que es conveniente tomar en cuenta las condiciones de cada sistema donde se trabaje y hay que detallar lo necesario, de acuerdo a la precisión que deseamos tener en nuestros cálculos.

Los diodos son aplicados en muy variados circuitos con funciones diferentes tales como: interruptores para rectificación, de marcha libre, en reguladores conmutados, en inversión de cargas en capacitores, transferencia de energía entre componentes de aislamiento de voltaje, retroalimentación de energía de la carga a la fuente de alimentación, etcétera.

2.2.2 Características de los diodos

Hay una gran variedad de parámetros que podremos analizar acerca de los diodos pero aquí veremos solo lo referente al efecto que tiene la temperatura en el componente o dispositivo, así también analizaremos las regiones de ruptura, polarización directa e inversa. A continuación se presentan los gráficos con que nos apoyaremos en estos temas de clase:

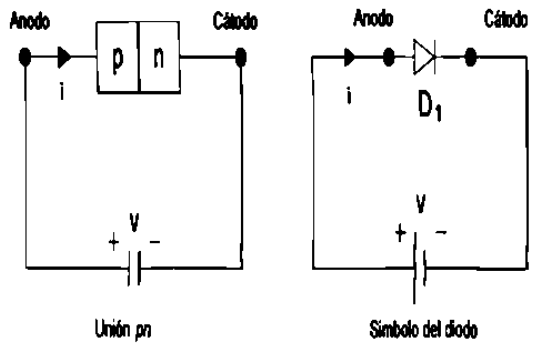


Figura 2.2.1 Símbolo diodo

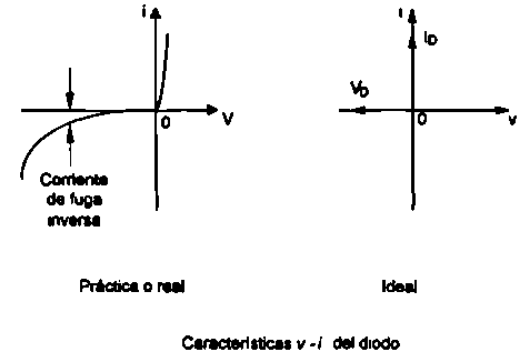


Figura 2.2.2 Característica v - i del diodo

Polarizacion directa de un diodo

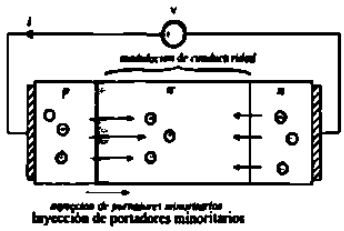


Figura 2.2.3

Diodos de potencia

Diodo de potencia bajo polarizacion inversa:

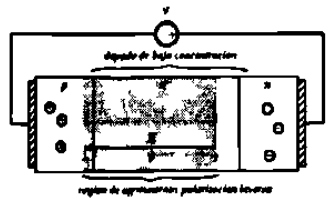


Figura 2.2.4

Forma de onda tipica de switcheo del diodo

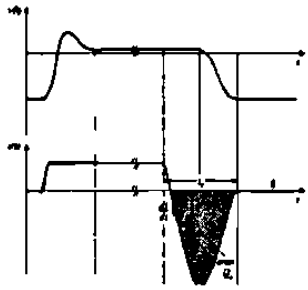


Figura 2.2.5

Tipos de diodos de potencia

Recuperacion estandar
- Tiempo de recuperacion no especificado, para 50/60Hz

Recuperacion Ultra-rapida
- Tiempo de recuperacion y carga especificado
- Para aplicaciones de convertidores

Diodo schottky
- Dispositivo de portadores mayoritarios
- No tiene tiempo de recuperacion
- Modelo con caracteristicas de equilibrio i-v, en paralelo con la capacitancia de la region de agotamiento
- Restringido a voltajes bajos (pos pueden bloquear 100V o mas)

Figura 2.2.6

Caracterisiticas de algunos diodos rectificadores de potencia comercialesNumero de parte

Numero de par	Maxim Voltage	Corriente promedio	V_F (tipico)	t_{rr} max
Rectificador de recuperacion rapida				
1N3913	400V	30A	1.1V	600ns
BDX33/BDX33B/BDX33C	250V	400A	2.2V	2us
Rectificador de recuperacion ultrarapida				
MURH1560	150V	30A	0.975V	35ns
MURH860	600V	15A	1.7V	60ns
RHRU10020	1200V	100A	3.6V	60ns
Rectificador Schottky				
30BQ040	40V	60A	0.48V	
60CNQ045	45V	600A	0.69V	
30CTQ150	150V	30A	1.19V	

Figura 2.2.7

Inspeccion a los dispositivos semiconductores de potencia

- Diodos de potencia
- MOSFETs de potencia
- Transistor de union bipolar (BJTs)
- Transistor de compuerta aislada (IGBTs)
- Tiristores (SCR, GTO, MCT)

- Resistencias vs. fallas por voltaje vs. tiempo de switcheo
- Mayoria y minoria de los dispositivos portadores

Figura 2.2.8

2.2.3 Clasificación de diodos

Como en cualquier fabricación de componentes o equipos, sabemos que a mayor calidad mayor costo, entonces, para tener una media óptima se tiene que prescindir de una muy alta calidad o de acuerdo al tipo de aplicación, rapidez de operación o capacidad de manejo de voltaje, para esto contamos con las siguientes gráficas en la cual presentamos únicamente la clasificación de los diodos y algunas gráficas.

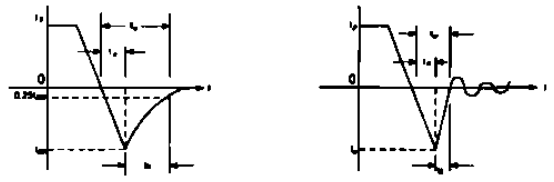


Figura 2.2.9 Tipo recuperación

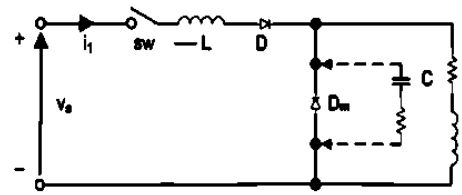


Figura 2.2.10 Protección 1

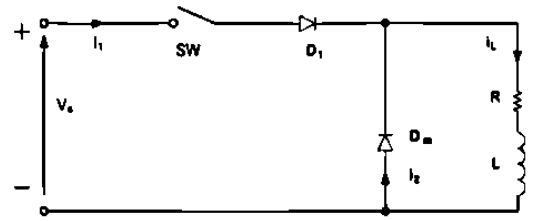


Figura 2.2.11 Protección 2

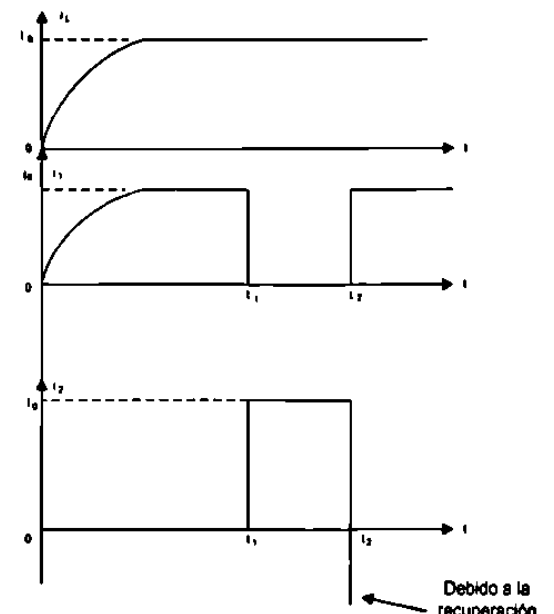


Figura 2.2.12 Forma onda a)

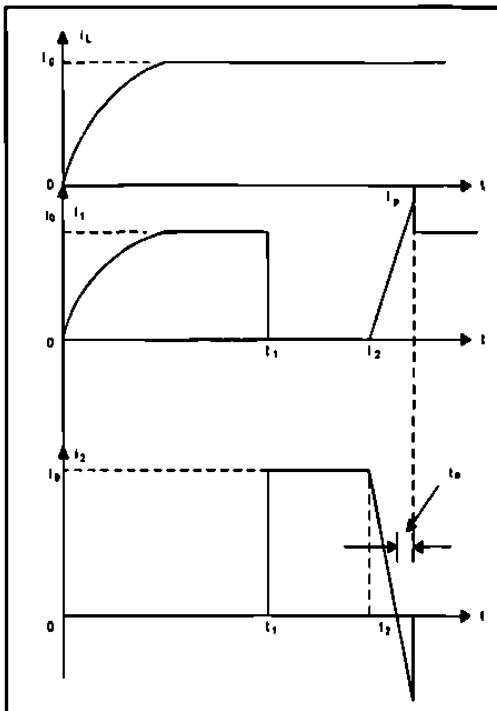


Figura 2.2.13 Forma onda b)

Problema 1

El tiempo de recuperación inversa de un diodo es trr=5μs, y la velocidad de reducción de la corriente del diodo es di/dt= 80 A/μs. Si el factor de suavidad es SF= 0.5, determine la carga de almacenamiento Qrr y la corriente inversa pico Irr.

trr=5 μs and di/dt = 80 A/μs

a) Ecuación (2.10) $trr = \sqrt{\frac{2QRR}{di/dt}}$

Q_{RR}= 0.5 (di/dt) trr^2 = 0.5 x 80x $5^2 x10^{-6}$ = 1000 μC

b) Ecuación (2.11) $I_{RR} = \sqrt{2QRR\frac{di}{dt}}$

$I_{RR} = \sqrt{2Q_{RR}\, di/dt} = \sqrt{2x1000x800} = 400$ A

Problema 2

Los valores medidos de un diodo a una temperatura de 25°C son V_{D1}= 1.0v a I_{D1}=50 A, V_{D2}=1.5V a I_{D2} = 600 A. Determine el coeficiente de emisión *n* y la corriente de fuga. V_T=25.8x10^{-3}mV

De la ecuación (2-3) despejamos el logaritmo natural (base e)

$$I_D = I_S (e^{\frac{V_T}{nV_T}} - 1)$$

$$\ln I_D = \ln I_S + \frac{V_D}{n V_T}$$

Después de la simplificación obtenemos el voltaje del diodo V_D el cual queda como:

$$V_D = n \quad V_T \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_S}\right)$$ donde: n = factor de idealidad

Si la corriente del diodo I_{D1}, corresponde al voltaje de diodo V_{D2}, obtenemos:

$$V_{D1} = V_T \log\left(\frac{I_{D1}}{I_S} \right)$$

Si V_{D2} es similar al voltaje del diodo, este corresponde a la corriente del diodo I_{D2}, y obtenemos.

$$V_{D2} = nV_T \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_S} \right)$$

Por lo tanto, la diferencia dentro del voltaje del diodo puede ser expresada por:

$$V_{D2} - V_{D1} = nV_T \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_S} \right) - nV_T \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_S} \right) = nV_T \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_{D1}} \right)$$

a) Para $V_{D2} = 1.5\ V$, $V_{D1} = 1.0V$, $I_{D2} = 600A$, and $I_{D1} = 50A$,

$1.5 - 1.0 = n \times 0.0258 \times \ln\left(\frac{600}{50} \right)$, el resultado de $n = 7.799$

b) Para.

$V_{D1} = 1.0V$, $I_{D1} = 50A$, y $n = 7.799$

$1.0 = 7.799 \times 0.0258 \times \ln\left(\frac{50}{I_S} \right)$, el resultado de $I_S = 0.347A$.

2.2.4 Diodos conectados en serie o en paralelo

A continuación se analizará el porqué de las instalaciones que tienen diodos en serie o paralelo y sus protecciones. Cuando no se dispone de elementos que cuentan la capacidad de voltaje es necesario conectarlos en serie para poder manejar un mayor voltaje, pero el conectarlos en serie puede ocasionar daños cuando se presentan voltajes transitorios, lo que se corrige con circuitos de protección. Conectando en paralelo un RC para evitar que el dv/dt del transitorio sea menor que la del componente de potencia o diodo.

En el caso de que pueda ser necesario manejar altas corrientes y no se dispone de componentes de la capacidad, es necesario conectar diodos en paralelo, los que soportarían la capacidad de la corriente. Pero si se presentan transitorios en convertidores podrían sufrir daños los elementos, por lo que es necesario que se conecten en serie con el elemento un RL que permite que al transitorio di/dt sea menor que el permitido en el elemento de potencia.

A continuación se presentan figuras con los circuitos, gráficas de comportamiento y además de problemas que nos permiten calcular las capacidades de los RL o RC necesarios.

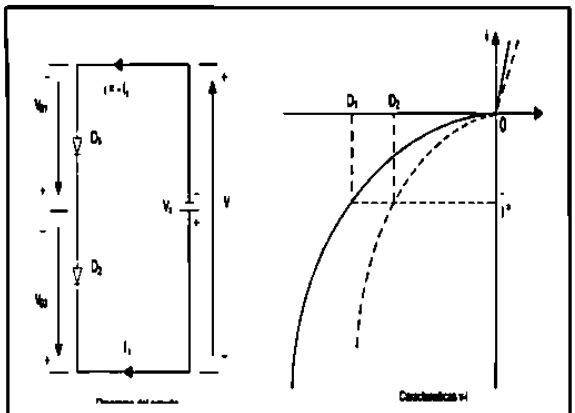


Figura 2.2.14 Diodo serie

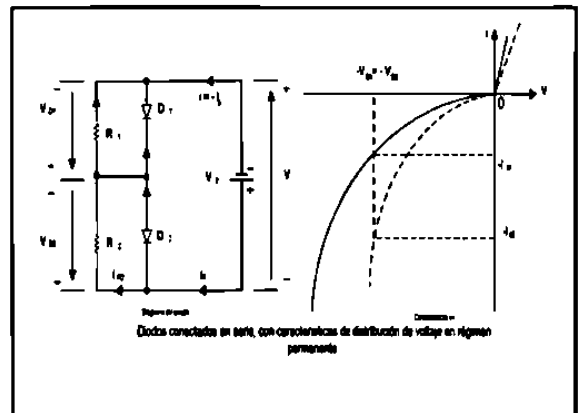


Figura 2.2.15 Diodos serie, con R

Problema 3

Dos diodos están conectados en serie y el voltaje a través de cada uno de ellos se mantiene igual mediante la conexión de una resistencia de distribución de voltaje, de tal forma que V_{D1}= V_{D2}= 2000 V y R_1= 100 KΩ. Las características *v-i* de los diodos aparecen en la figura. Determine las corrientes de fuga de cada diodo y la resistencia R_2 a través del diodo D_2

$V_{D1} = V_{D2} = 2000V,\ R_1 = 100K\Omega$

a) De la figura 2.2.16

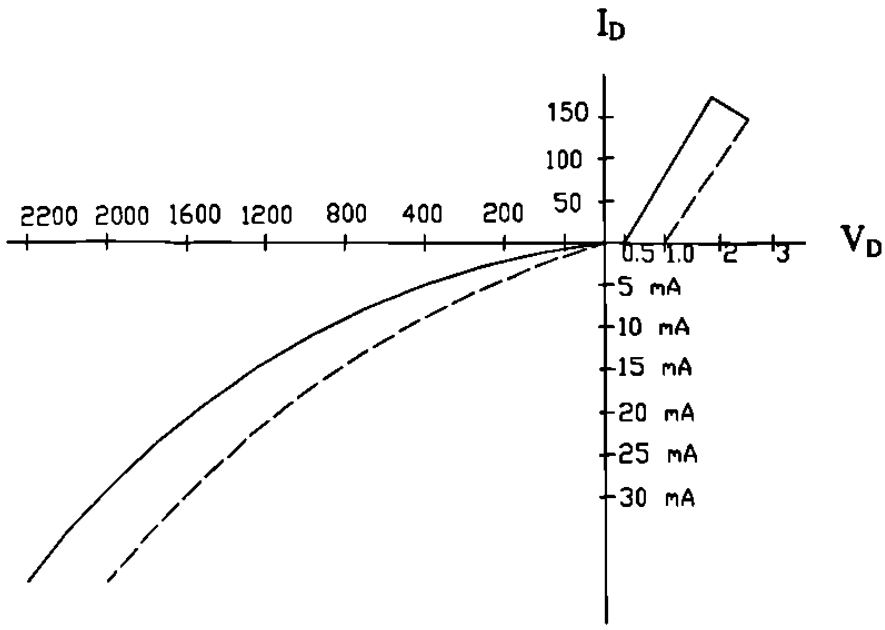


Figura 2.2.16 Característica de diodos en serie

Las corrientes son: $I_{s1} = 17mA$ y $I_{s2} = 25mA$

$$I_{R1} = \frac{V_{D1}}{R_1} = \frac{2000}{100000} = 20mA$$

b) De la ecuación 2-18, $I_{S1} + I_{R1} = I_{S2} + I_{R2}$

o $17 + 20 = 25 + I_{R2}$, o $I_{R2} = 12mA$

$R_2 = 2000/12 \quad mA = 166.67K\Omega$

Problema 2.4

Dos diodos están conectados en paralelo siendo la caída de voltaje directa a través de cada uno de ellos de 1.5V. Las características *v-i* de los diodos aparecen en la figura P2-3. Determine las corrientes directas a través de cada diodo.

Para V_D= 1.5V, figura P2-3 las corrientes I_{D1}= 140 y I_{D2}= 50 A

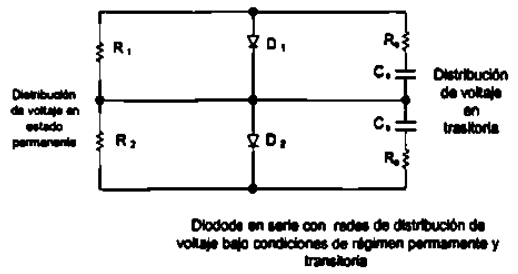


Figura 2.2.17 Diodos en serie con distribución de voltaje

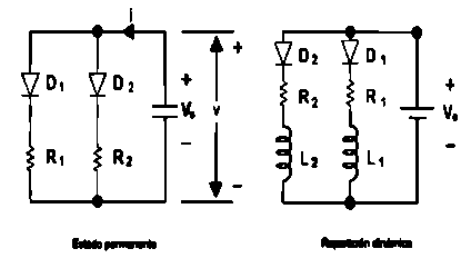


Figura 2.2.18 Diodos en paralelo

Problema 4

Dos diodos están conectados en paralelo, como se muestra en la figura 2.2.18, con resistencias de repartición de corriente. Las características *v-i* se muestran en la figura 2.2.16 . La corriente total es I_T=200 A. El voltaje a través de un diodo y su resistencia es V= 2.5 V. Determine los valores de las resistencias R_1 y R_2 si la corriente se comparte en forma ideal entre ambos diodos.

$I_T = 200A, \ V = 2.5$

$I_1 = I_2, \ I_1 = \frac{I_T}{2} = \frac{200}{2} = 100\ A$

$Para \quad I_1 = 100A, \ Figura\ 2.2.16 \quad \text{los valores son} \quad V_{D1} = 1.1V \quad y \quad V_{D2} = 1.95V$

$V = V_{D1} + I_1\ R_1$ ó $2.5 = 1.1 + 100 \quad R_1$ ó $R_1 = 14m\Omega$

$V = V_{D2} + I_2\ R_2$ ó $2.5 = 1.95 + 100 \quad R_2$ ó $R_2 = 5.5m\Omega$

2.3 Circuitos con Diodos Rectificados

2.3.1 Antecedentes

Recordemos que los diodos son aplicados para convertir CA a CD no controlada o también conocido como fija.
Recordemos que los análisis hechos son considerando voltaje del diodo en conducción igual a cero a igual que el tiempo de recuperación inversa.

2.3.2 Circuitos con cargas RC, RL, LC, RLC.

A continuación se presentan los circuitos a analizar, pero se recomienda que se dé un repaso a las leyes fundamentales aplicadas en inductancias y capacitancias, sin olvidar las unidades para una mejor comprensión del comportamiento de estos elementos que serán principalmente aplicados como cargas, otro concepto que es necesario tener muy en claro es el concepto de resonancia.

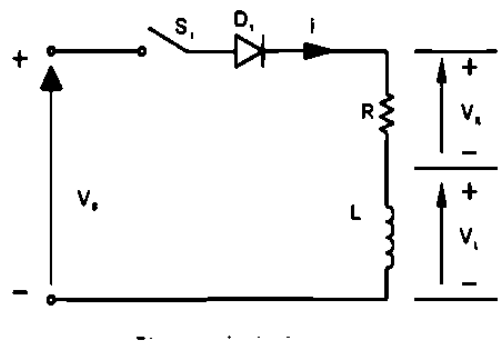


Figura 2.3.1 Diodo con carga RL

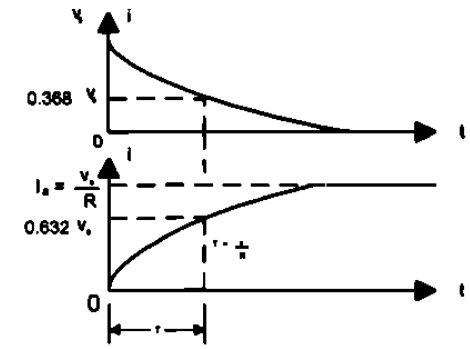


Figura 2.3.2 Curva típica RL

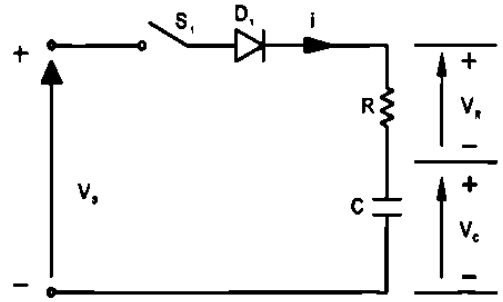


Figura 2.3.3 Diodo con carga RC

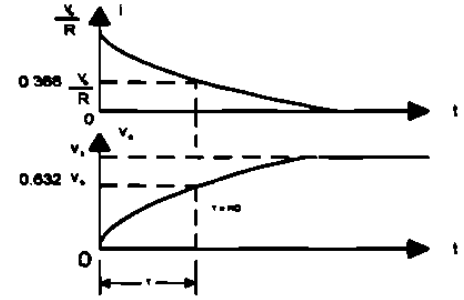


Figura 2.3.4 Curva típica RC

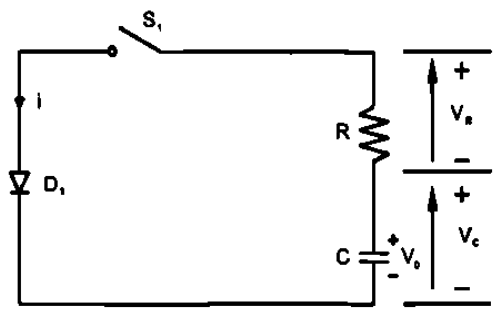


Figura 2.3.5 Descarga de RC

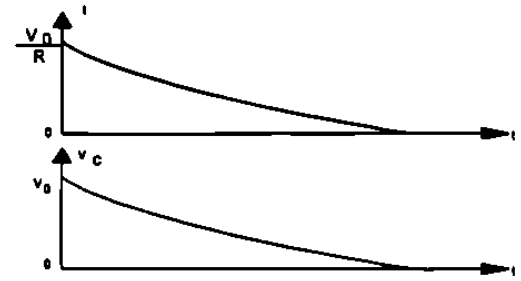


Figura 2.3.6 Curva de 2.3.5

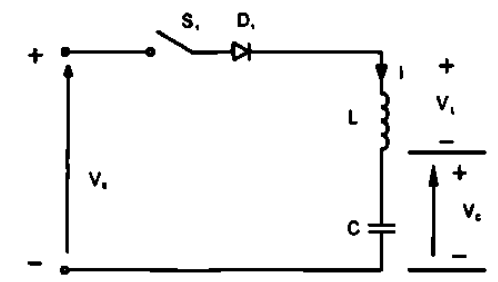


Figura 2.3.7 Diodo con carga LC

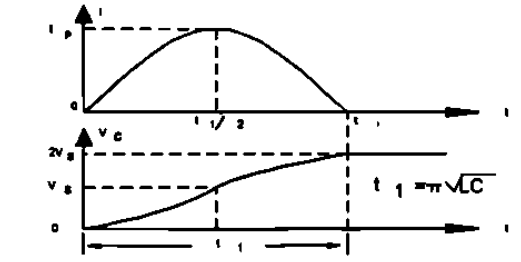


Figura 2.3.8 Curva típica LC

A continuación se presenta el análisis de circuito RLC .

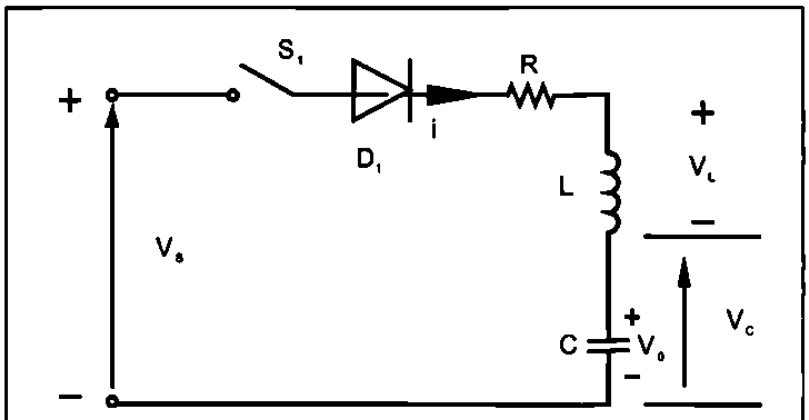


Figura 2.3.9 Diodo con RLC

En la figura 2.3.9 aparece un circuito de diodo con carga RLC. Si el interruptor S_1 se cierra en t=0, podemos utilizar la ley Kirchoff para escribir la ecuación de la corriente de carga i como

$$L\frac{di}{dt}+Ri+\frac{1}{C}\int idt+v_c(t=0)=V_s$$

con condiciones iniciales $i(t=0)$ y $v_c(t=0)=v_0$. Al diferenciar la ecuación y dividir ambos miembros entre L, obtenemos

$$\frac{d^2i}{dt^2}+\frac{R}{L}\frac{di}{dt}+\frac{i}{LC}=0$$

Bajo condiciones de régimen permanente u operación normal, el capacitor está cargado al voltaje fuente V_s, siendo la corriente de régimen permanente cero. También la ecuación es cero la componente forzada de la corriente. La corriente se debe al componente natural.
La ecuación característica de la transformada de Laplace de s es

$$s^2+\frac{R}{L}s+\frac{1}{LC}=0$$

Las raíces de la ecuación cuadrática están dadas por

$$s_{1,2}=-\frac{R}{2L}\pm\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2-\frac{1}{LC}}$$

El *Factor de amortiguamiento*,

$$\varepsilon=\alpha=\frac{R}{2L}$$

La *Frecuencia de resonancia*,

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación, obtenemos

$$s_{1,2}=-\alpha\pm\sqrt{\alpha^2-\omega_0^2}$$

La solución en función de la corriente, que dependerá de los valores de α y de ω_0, seguiría alguno de tres casos posibles.

Caso 1. Si $\alpha = \omega_0$, las raíces son iguales, $s_1 = s_2$, y el circuito se conoce como *críticamente amortiguado*, la solución será de la forma

$$i(t) = (A_1 + A_2 t)e^{s_1 t}$$

Caso 2. Si $\alpha > \omega_0$, las raíces serán reales y el circuito se dice que estará *sobre amortiguado*. La solución toma la forma

$$i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

Caso 3. Si $\alpha < \omega_0$, las raíces serán complejas y el circuito se dice que estará *subamortiguado*. Las raíces son

$$s_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_r$$

donde ω_r se conoce como la *frecuencia de resonancia* (o la frecuencia resonante amortiguada) y $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$. La solución toma la forma

$$i(t) = e^{-\alpha t}(A_1 \cos\omega_r t + A_2 sen\omega_r t)$$

que es una *sinusoide amortiguada* o *de decaimiento*.

Problemas

Ejemplo 1

Si el interruptor S1 de la figura 2.3.10 se cierra en t=0, determine la expresión para:

(a) la corriente que fluye a través del interruptor i(t) y
(b) la velocidad de elevación de la corriente di/dt.
(c) Dibuje curvas corriente contra tiempo, di/dt.
(d) ¿Cuál es el valor de di/dt inicial? Para la figura 2.3.10 encuentre solo di/dt inicial.

Ejemplo 1

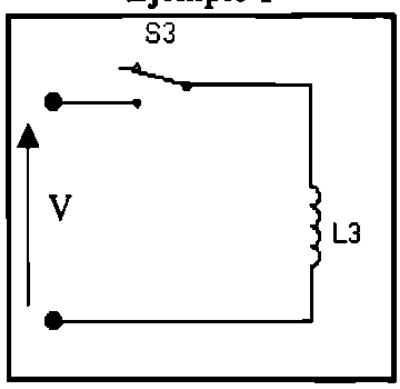


Figura 2.3.10 Problema ejemplo 1

$(a)\quad L\dfrac{di}{dt} = \mathrm{V} \quad o \quad i = \dfrac{V}{L}\int dt$

$(b)\quad di/dt = v_s / L;$

$(c)\quad di/dt \quad (a \quad t = 0) \quad = v_s / L.$

Ejemplo 2

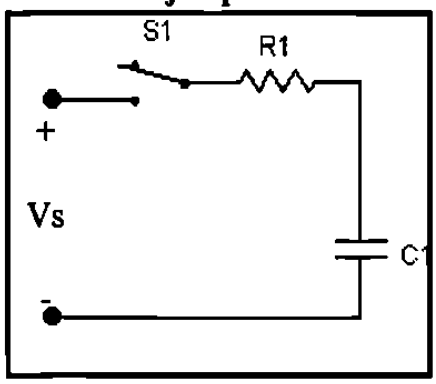


Figura 2.3.11 Problema ejemplo 1

$(a)\quad \dfrac{1}{C}\int i \;\; \mathrm{dt} \;+\; \mathrm{Ri} = \mathrm{Vs} \;-\; \mathrm{V}_0 \quad o \quad i(t) = \dfrac{v_s - v_o}{R}\, e^{-t/RC}$

$(b)\quad \dfrac{di}{dt} = -\dfrac{v_s - v_o}{R^2\, C}\, e^{-t/RC}$

$(c)\quad En \quad t = 0,\; di/dt = (v_s - v_o)/(R^2\, C)$

Ejemplo 3

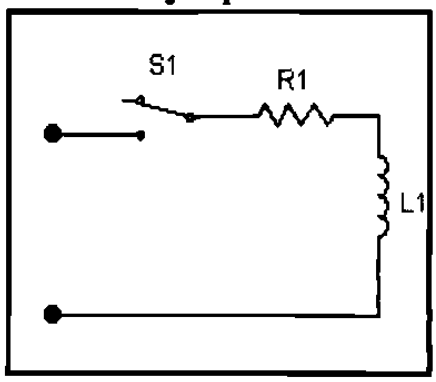


Figura 2.3.12 Problema ejemplo 1

$(a)\quad L\dfrac{di}{dt} + R\, i = v_s \quad o \quad i(t) = \dfrac{v_s}{R}\, e^{-tR/L}$

$(b)\quad \dfrac{di}{dt} = \dfrac{v_s}{L}\, e^{-tR/L}$

$(c)\quad En \quad t = o,\; di/dt = \dfrac{Vs}{L}$

Ejemplo 4

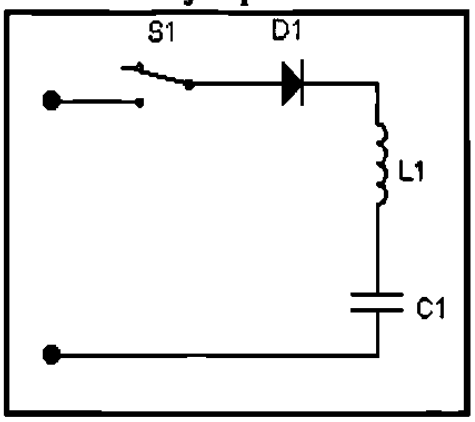


Figura 2.3.13 Problema ejemplo 1

$$(a)\quad v_s = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i\,dt + v_c(t=0)$$

con la condición inicial : $i(t=0)=0$ *y* $v_c(t=0)=v_o$,

$$i(t) = (v_s - v_o)\sqrt{\frac{C}{L}}\ \ sen\ \varpi ot = I_p\ sen\ \varpi ot$$

Donde $\varpi o = 1/\sqrt{(LC)}$

$$(b)\quad \frac{di}{dt} = \frac{v_s - v_o}{L}\cos \varpi ot$$

$$(d)\quad At\quad t=0,\ \ di/dt = (v_s - v_o)/L$$

Ejemplo 5

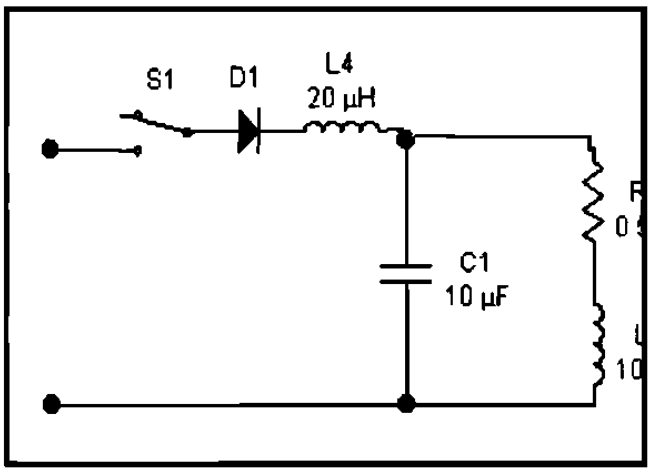


Figura 2.3.14 Problema ejemplo 1

En t=0, la inductancia se comporta como un circuito abierto y en el capacitor hay un corto circuito. La di/dt inicial es limitada solo por la inductancia L1. Así la di/dt inicial es:

$$di/dt = v_s/L_1 = v_s/20\mu H = v_s/20\quad A/\mu s$$

2.3.3 Diodos de Marcha Libre

Para explicar el comportamiento del diodo de marcha libre es mas práctico observando el circuito correspondiente y así ya comprendido pasar a realizar los cálculos necesarios que se requieren en los problemas.

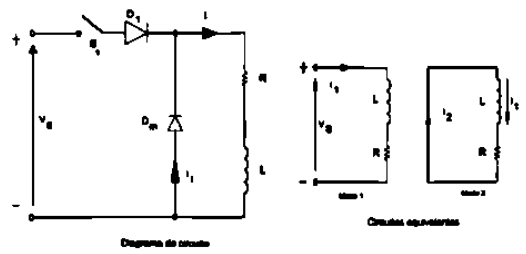


Figura 2.3.15 circuito con diodo marcha libre

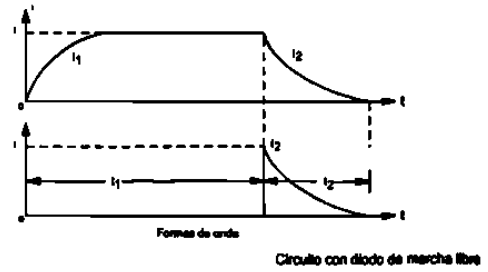


Figura 2.3.16 Curvas de 2.3.15

Problema

Un circuito de diodo aparece en la figura anterior con R= 10Ω, L= 5mH y Vs=220V. Si fluye una corriente de carga de 10 A a través del diodo de marcha libre Dm y el interruptor *S*1 se cierra en t=0, determine la expresión de la corriente *i* a través del interruptor. Considere al diodo como ideal sin caída de voltaje a través de éste.

$R = 1$

El interrupto r de corriente se describe con

$$Vs = L\frac{di}{dt} + R\,i$$

Con la condición inicial : $i(t=0) = I_1$,

$$i(t) = \frac{Vs}{R}(1 - e^{-tr/L}) + I_1 \quad e^{-tR/L} = 22 - 12\,e^{-2000t}\,A$$

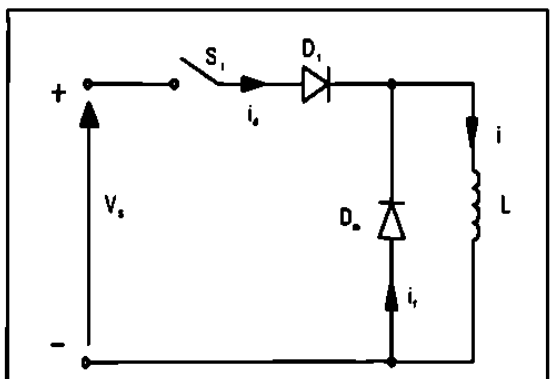


Figura 2.3.17 Problema ejemplo 2

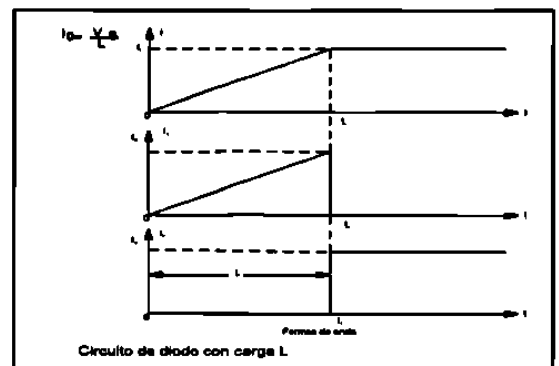


Figura 2.3.18 Curvas típicas

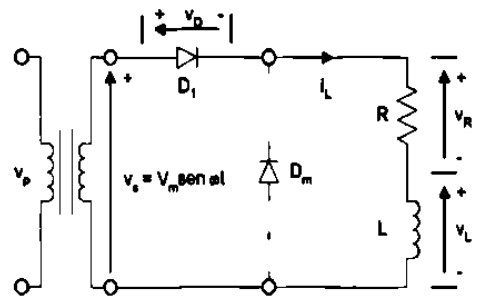


Figura 2.3.19 Circuito con CA

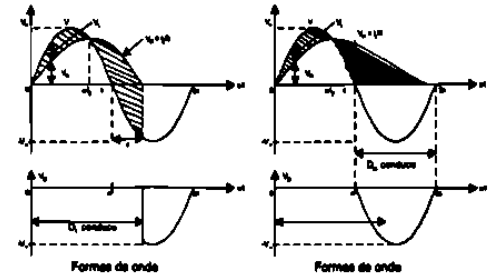


Figura 2.3.20 Curvas de 2.3.19

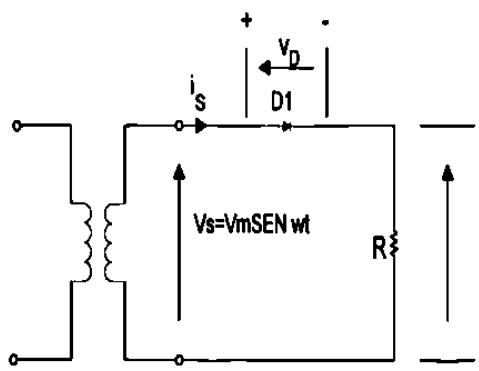


Figura 2.3.21 Circuito de CA y R

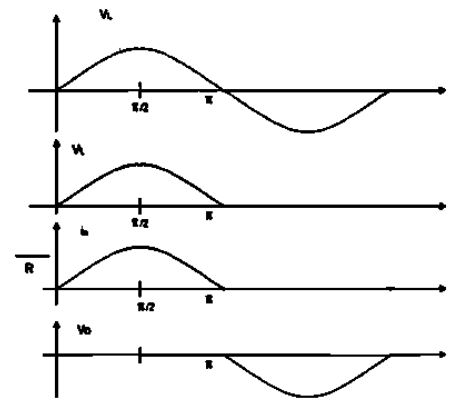


Figura 2.3.22 Curvas

2.3.4 Parámetros de rendimiento

Para analizar la calidad de la energía obtenida de un rectificador de cualquier tipo y los rendimientos de estos, se analizarán y calcularán los parámetros. Y estos son los siguientes: V_{CD}, I_{CD}, P_{CD}, V_{RMS}, I_{RMS}, P_{RMS}, η , V_{CA}, FF, RF, TUF, DF, HF, PF, CF.

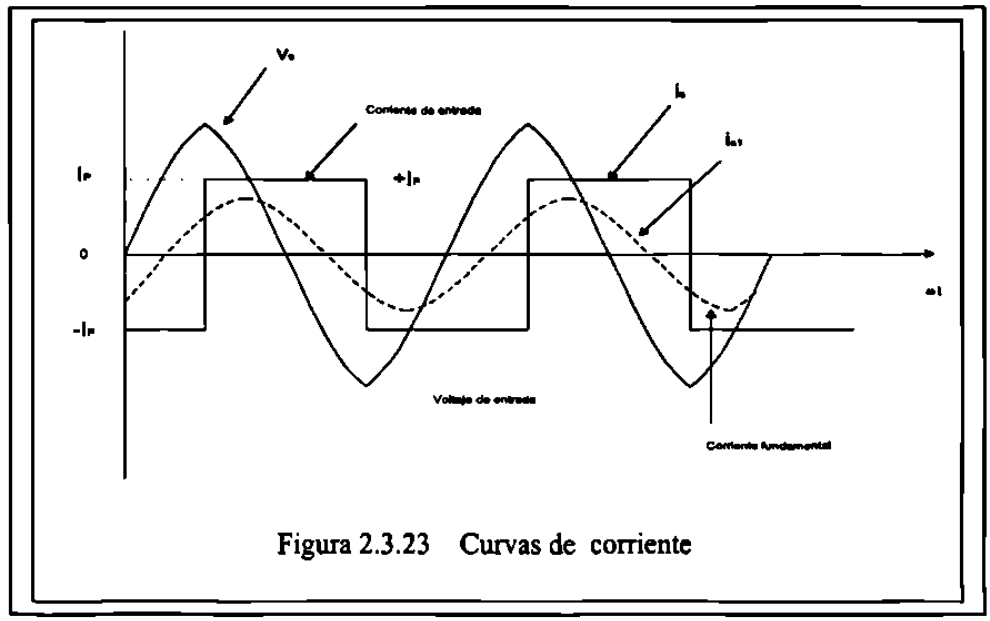


Figura 2.3.23 Curvas de corriente

3-12 ¿Cuáles son los parámetros de rendimiento de un rectificador?

Eficiencia $\eta = \frac{P_{cd}}{P_{ca}}$

$$RF = \frac{V_{ca}}{V_{cd}}$$

$$V_{ca} = \sqrt{V_{rms}^{2} - V_{cd}^{2}}$$

Factor de Forma

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{cd}}$$

Factor de Componente Ondulatoria

$$RF = \frac{V_{ca}}{V_{cd}}$$

Eficiencia

$$\eta = \frac{P_{cd}}{P_{ca}}$$

Eficiencia: porcentaje de la energía alterna que se aprovecha para convertirla en energía de corriente directa.

Factor de Utilización del Transformador

$$TUF = \frac{P_{cd}}{V_s I_s}$$

el porcentaje de la energía eficaz aportada por el transformador que se aprovecha para convertirla en potencia directa al circuito.

Factor de Desfase

DF= cosϕ; es el coseno del ángulo que existe entre las componentes fundamentales de la corriente y el voltaje.

Factor de Potencia de Entrada

$$PF = \frac{V_s I_{s1}}{V_s I_s}$$

$$Cos\phi = \frac{I_{s1}}{I_s} Cos\phi$$

Factor de Armónicas

HF; es una medida de la distorsión de una forma de onda y también se conoce como distorsión armónica total(THD) y se define como:

$$HF = \sqrt{\frac{(I_s^2 - I_{s1}^2)}{I_{s1}^2}} = \sqrt{\frac{(I_s^2 - 1)}{I_{s1}^2}}$$

2.3.5 Rectificación de ½ ondas y onda completa con carga R

De acuerdo a los diferentes circuitos para la rectificación de ½ y onda completa se analizan sus formas de rectificar y su comportamiento, para después pasar a calcular los de rendimiento para cada uno de los tipos de rectificación con los diferentes tipos de carga .

A continuación se presentan los diferentes circuitos típicos, las gráficas que se obtienen y algunos de los problemas típicos resueltos.

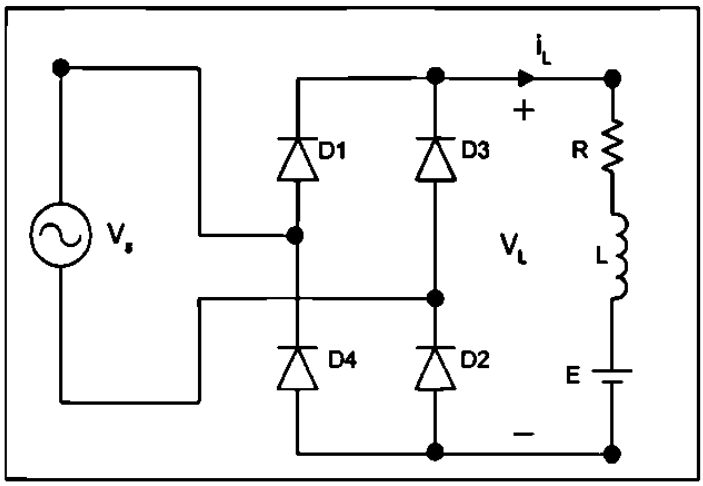


Figura 2.3.24
Puente Rectificador onda completa

Problema

Un puente rectificador monofásico tiene una carga permanente resistiva R=10Ω ,el voltaje pico de alimentación Vm= 170V y la frecuencia de alimentación f=60Hz. Determine el voltaje promedio de salida del rectificador, si la inductancia de la fuente es despreciable.

$V_m = 170\ V,\ \ R = 10\ \Omega,\ \ f = 60\ Hz$

$$V_{cd} = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} \text{Vm sen } \omega t\ dt = \frac{2\text{Vm}}{\pi} = 0.6366 \quad \text{Vm}$$

$$V_m = 0.6366 \times 170 = 113.32 \quad \text{V}$$

2.3.6 Rectificación de ½ y onda completa trifásica con carga R

Se analizará ahora los circuitos para rectificación de ½ y ondas completas trifásica y se analiza como se incrementa la eficiencia, si se incrementa el número de fases y los efectos armónicos en los circuitos de rectificación. Analizando también los parámetros de rendimiento para éstos.

A continuación se presentan los diferentes circuitos típicos, las gráficas que se obtienen y algunos de los problemas típicos resueltos.

Problema

Un rectificador de seis fases en estrella tiene una carga puramente resistiva R=10Ω , un voltaje pico de alimentación Vm= 170V y la frecuencia de alimentción f=60 Hz. Determine el voltaje promedio de salida del rectificador, si la inductancia de la fuente es despreciable.

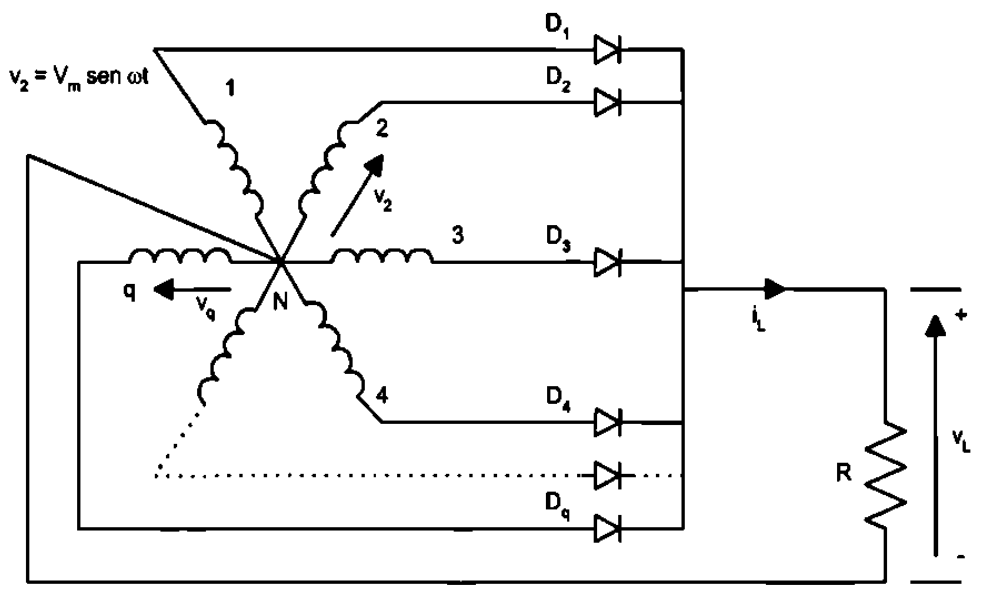


Figura 2.3.25 Rectificador multifase

$R = 10\Omega, \quad V_m = 170V, f = 60\ Hz$

Para un rectificador de seis fases en estrella $q = 6$

$$V_{cd} = \frac{2}{2\pi / q} \int_0^{T/q} \mathrm{Vm} \cos \omega t \, d(\omega t) = \frac{2\mathrm{Vm}}{\pi} = \mathrm{Vm} \frac{q}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{q}$$

$$V_{cd} = 170\,(60/\pi) \quad sen(\pi/6) = 162.34\,V$$

2.3.7 Los efectos de cargas RL y filtros

De acuerdo a la carga que se presente en un circuito rectificador estos presentaran cambios en su comportamiento y por lo tanto en los parámetros de rendimiento. Por lo que se analizan en este apartado, los puntos que mayor cambio tienen, y que nos afectan la eficiencia y la calidad de rectificación. Uno de estos parámetros es el factor armónico presente que puede estar del lado de la alimentación o bien del lado de la carga, el cual se puede atenuar o eliminar con filtros.
Los filtros para ser aplicados del lado de la carga pueden ser L, C, o LC . Si fueran aplicados en la alimentación de CA estos deberán ser del tipo LC.

En algunos circuitos de rectificación se presentan inductancias tanto del lado de la alimentación como de lado de la carga y el comportamiento de las gráficas de Voltaje y de corriente en los diferentes puntos del circuito presentan mucho cambio, se recomienda que se utilice la simulación de este circuito en MATLAB o PSPICE que se encuentra en el apartado de PROGRAMAS DE SIMULACION, no sin dejar de hacer los cálculos en los problemas resueltos que se presentan de los circuitos de rectificación con diferentes tipos de cargas.

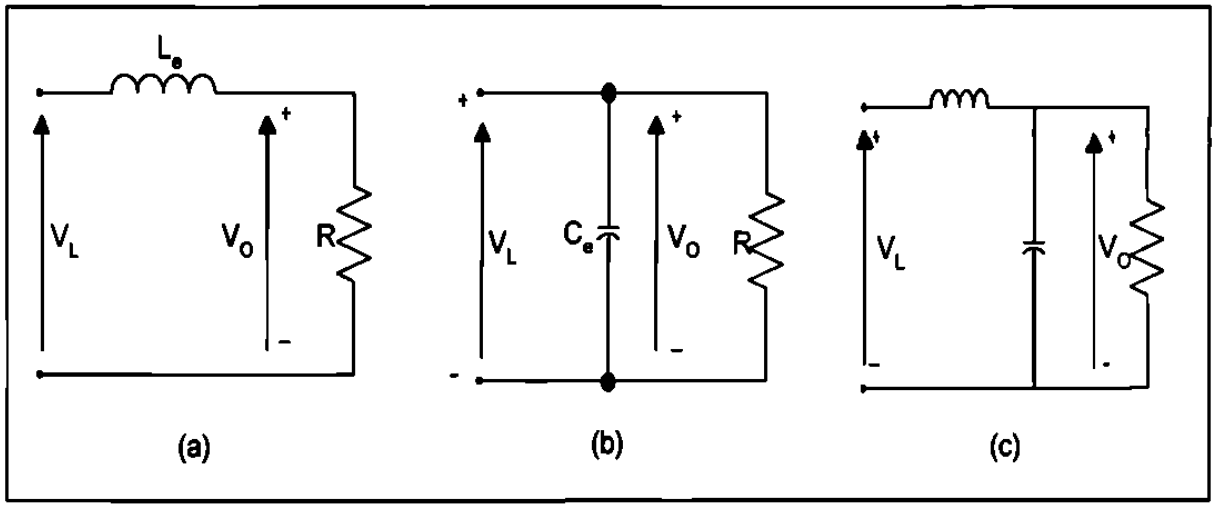


Figura 2.3.26 Filtro CD

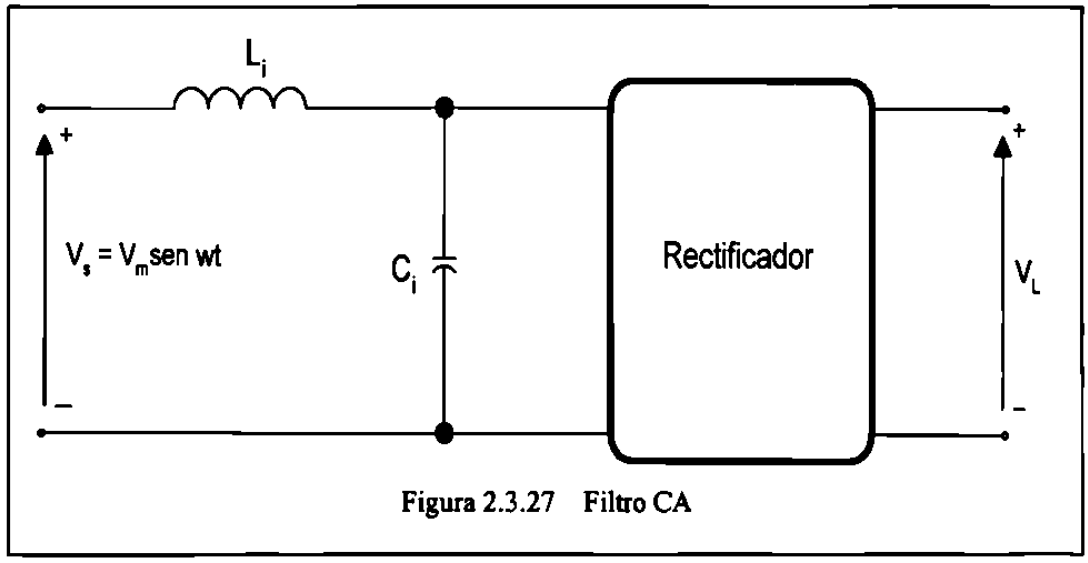


Figura 2.3.27 Filtro CA

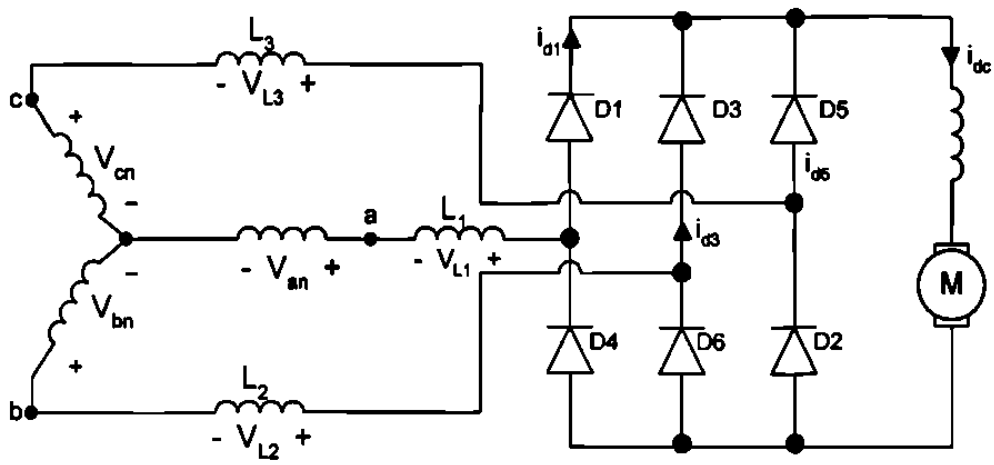


Figura 2.3.28 Circuito trifásico

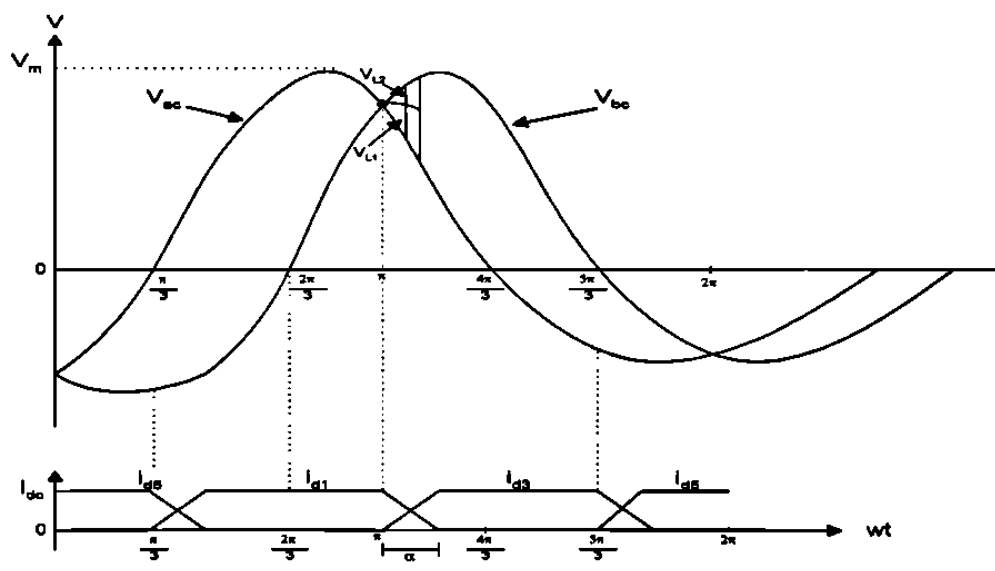


Figura 2.3.29 Curva

Problema para resolver con Pspice

El rectificador trifásico de onda completa de la figura 2.3.30 a tiene una carga L=2.5 mH, R=5Ω y E=20V. El voltaje de entrada, línea a línea es V_{ab}=208 V, 60Hz.
(a) Determine
(1) la corriente de carga en régimen permanente I_1 a ωt=π/3,
(2) la corriente promedio de diodo I_d,
(3) la corriente rms de diodo I_r y
(4) la corriente rms de salida I_{rms}.
(b) Utilice PSpice para graficar la corriente instantánea de salida i_L. Suponga los parámetros de diodo IS= 2.22E-15, BV=1800V.

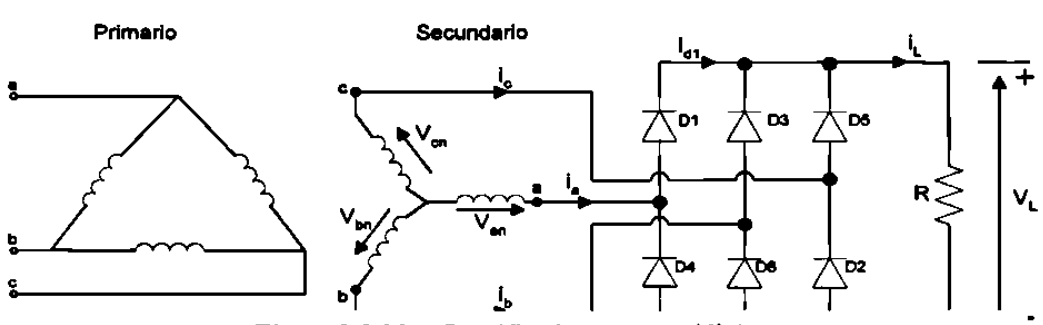


Figura 2.3.30 Rectificador puente trifásico

(a) $R = 5\Omega, L = 2.5mH, f = 60Hz, w = 2\pi * 60 = 377 rad/s$

$V_{ab} = 208V, z = [R^2 + (wL)^2]^{1/2} = 5.09\Omega, y\ \theta = tan^{-1}(wL/R) = 10.67°$

1.– *El estado inicial de la corriente de carga es* $t = \pi/3, I_1 = 50.6\ A.$

2.– *La integración numérica de* i_L *en la ecuación (3.84) cambia la corriente promedio del diodo como* $Id = 17.46\ A$. *Desde* $I_1 > 0$, *la corriente de carga es continua.*

3.– *Con la integración numérica de* i_L^2 *entre los límites* $wt = \pi/3$ *to* $2\pi/3$, *encontramos la corriente del diodo como* $Ir = 30.2\ A.$

4.– *La corriente de salida rms* $I_{rms} = \sqrt{3}Ir = \sqrt{3} \times 30.2 = 52.31A.$

2.4 Tiristores

2.4.1 Antecedentes

El SCR o TIRISTOR es un dispositivo semiconductor de potencia, el cual es considerado como un interruptor conmutador o un elemento que puede estar en un estado de no-conducción o en conducción, considerándolo como interruptor ideal para situaciones de análisis. Hay una evolución en estos elementos con características mejoradas de los cuales se analizan en esta los más similares al SCR en esta sección.

2.4.2 Características de los tiristores

El SCR es un elemento de cuatro capas con tres terminales A, K y G que corresponden al ánodo, cátodo y compuerta respectivamente. En las figuras se muestra el símbolo del SCR y dos gráficas de Voltaje-Corriente, una para A-K y otro por G-K, con los cuales nos apoyaremos para la explicación de la forma de actuar del SCR, ya que se analiza el bloqueo en polarización directa e inversa, también sus corrientes de fuga, de voltajes de ruptura directa e inversa, activación para compuerta, caída de voltaje en conducción, corriente de enclavamiento y de sostenimiento.

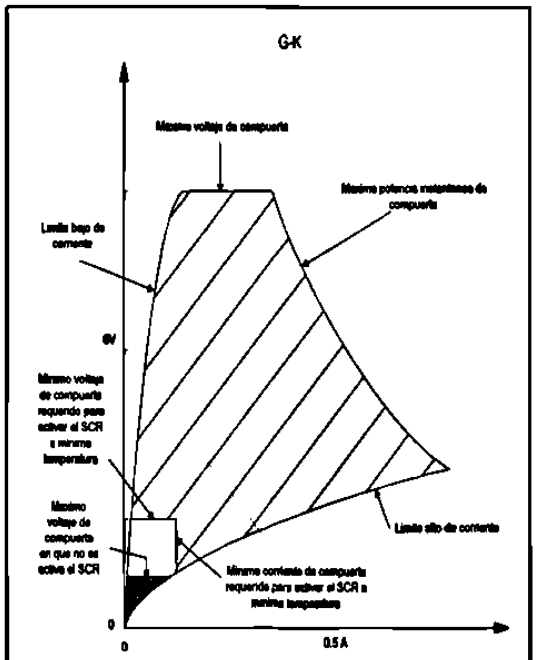


Figura 2.4.1 G-K

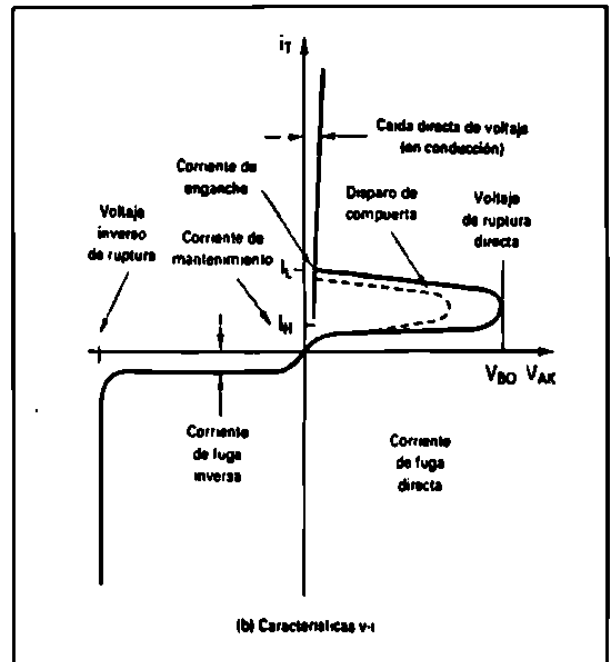


Figura 2.4.2 A-K

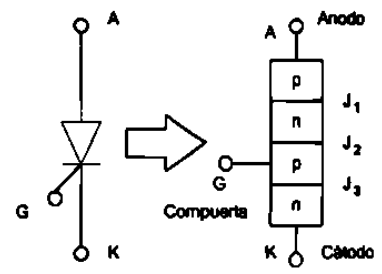


Figura 2.4.3 Símbolo tiristores

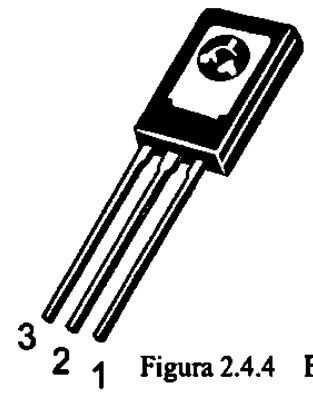


Figura 2.4.4 Elemento

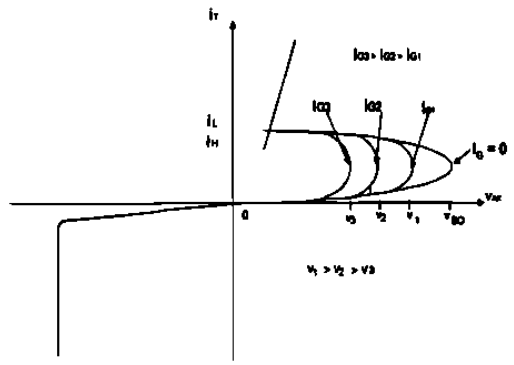


Figura 2.4.5 A-K V-I

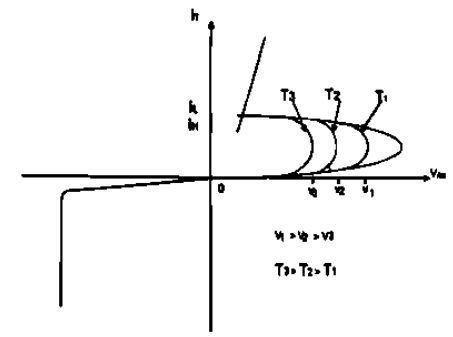


Figura 2.4.6 A-K V-T

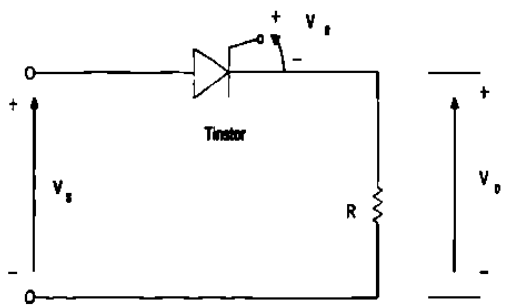


Figura 2.4.7 Activado SCR

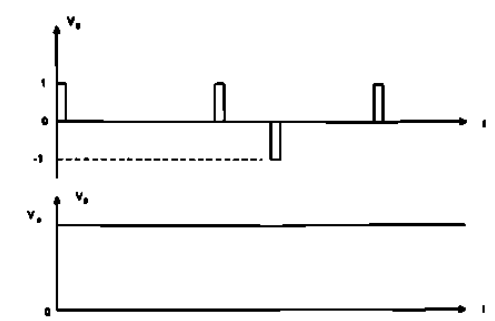


Figura 2.4.8 Curvas activado

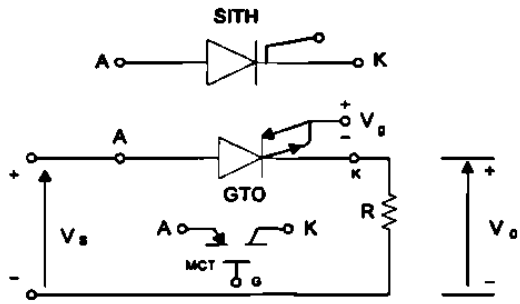


Figura 2.4.9 Activado GTO

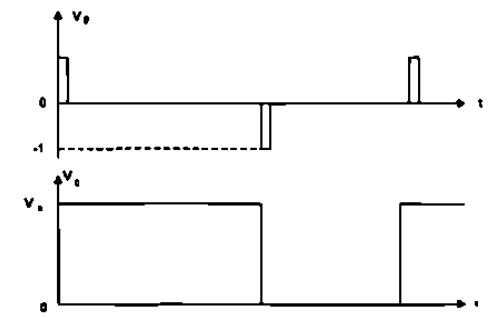


Figura 2.4.10 Curvas activado

2.4.3 Tipos de Activación y circuitos para activación del SCR.

Existen varias formas de activar los SRC como son: Térmica, Luz, Alto voltaje, dV/dT, y aplicación de señal en la compuerta.
Nuevamente nos basamos en las tablas para explicar adecuadamente cada una de los principios para activar el SRC.

Características	Símbolo	Mín	tipo	Máx	unidad
CARACTERISTICAS DE APAGADO					
(V_{AK}=Rated V_{DRM} or V_{RRM}, R_{GK}=1000Ohms) T_J=25°C T_J=110°C	I_{DRM}, I_{RRM}	- -	- -	10 100	µA µA
CARACTERISTICAS DE ENCENDIDO					
(I_{TM} = 1 A Peak for C106B D, & M) (I_{TM} = 4 A Peak for C106D1, & M1)	V_{TM}	-	-	2.2	Volts
(V_{AK} = 6 Vdc, R_L = 100 Ohms) T_J = 25°C T_J = -40°C	I_{GT}	- -	15 35	200 500	µA
Peak Reverse Gate Voltage (I_{RGM} = 10 µA)	V_{GRM}	-	-	6.0	Volts
(V_{AK} = 6 Vdc, R_L = 100 Ohms) T_J = 25°C T_J = -40°C	V_{GT}	0.4 0.5	.60 .75	0.8 1.0	Volts
(V_{AK} = 12 V R_L = 100 Ohms, T_J = 110°C)	V_{GD}	0.2	-	-	Volts
(V_{AK} = 12 V, I_G = 20 mA) T_J = 25°C T_J = -40°C	I_L	- -	.20 .35	5.0 7.0	mA
Holding Current (V_D = 12 Vdc) (Initiating Current = 20 mA, Gate Open) T_J = 25°C T_J = -40°C T_J = +110°C	I_H	- - -	19 33 .07	3.0 6.0 2.0	mA
CARACTERISTICAS DINAMICAS					
(V_{AK} = Rated V_{DRM}, R_{GK} = 1000 Ohms, T_J = 110°C)	dv/dt	-	8.0	-	V/µs

Tabla 2.4.11 Caracteristicas

Rangos	Símbolo	Valor	Unidades
Picos Repetitivos en-estado de Voltaje (1) (Onda seno, 50-60 Hz, R_{GK} = 1 kΩ, T_C = -40° to 110°C) C106B C106D, C106D1 C106M, C106M1	V_{DRM} V_{RRM}	 200 400 600	Volts
Activado Corriente RMS (180° Angulo Conduccion, TC = 80°C)	$I_{T(RMS)}$	4.0	Amps
Corriente promedio activado el SCR (180° Angulo Conduccion, TC = 80°C)	$I_{T(AV)}$	2.55	Amps
Picos no repetitivos de la I de surge (½ Ciclo, Onda seno, 60 Hz, TJ = +110°C)	I_{TSM}	20	Amps
Consideración de fusión del circuito	I^2T	1.65	A^2s
Picos de potencia en la compuerta (Ancho de pulso ≤ 1.0 µsec, TC = 80°C)	P_{GM}	0.5	Watts
Potencia promedio en la compuerta (Ancho de pulso ≤ 1.0 µsec, TC = 80°C)	$P_{G(AV)}$	0.1	Watts
Picos de corriente en la compuerta (Ancho de pulso ≤ 1.0 µsec, TC = 80°C)	I_{GM}	0.2	Amp
Rango de temperatura en la unión	T_J	- 40 to + 110	°C
Rango de temperatura de almecenaje	T_{stg}	- 40 to + 150	°C
Torque de Montaje	-	6.0	in. lb.

Tabla 2.4.12 Rangos

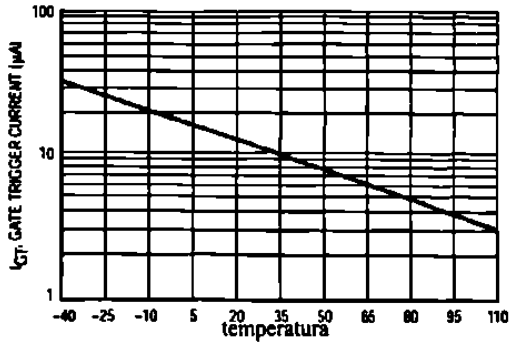


Figura 2.4.13 I_{GT} activado

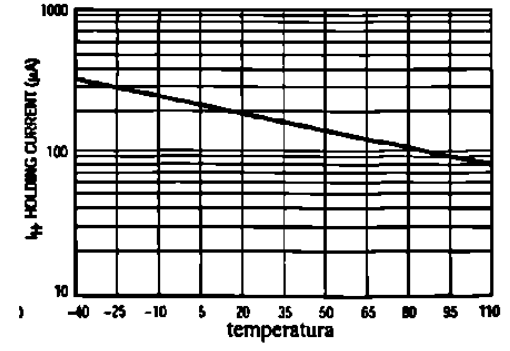


Figura 2.4.14 I_H Sostenimiento

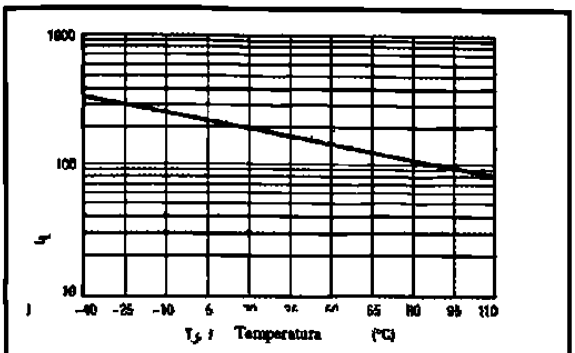


Figura 2.4.15 I_L Enclavamiento

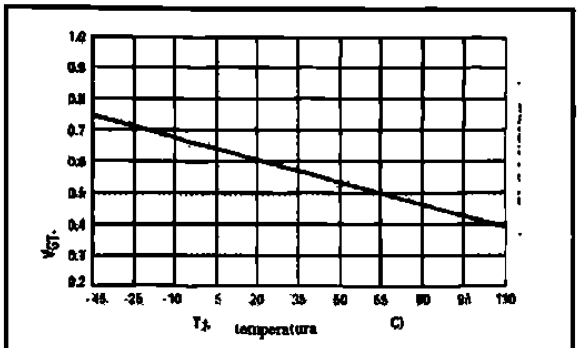


Figura 2.4.16 V_{GT} Activado

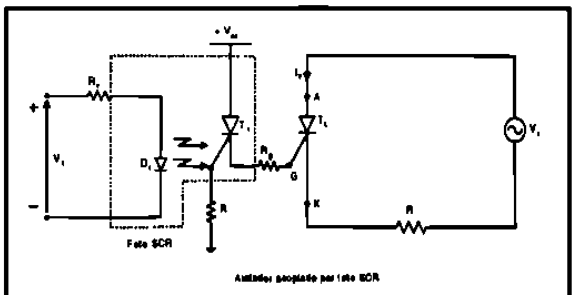


Figura 2.4.17 Foto SCR

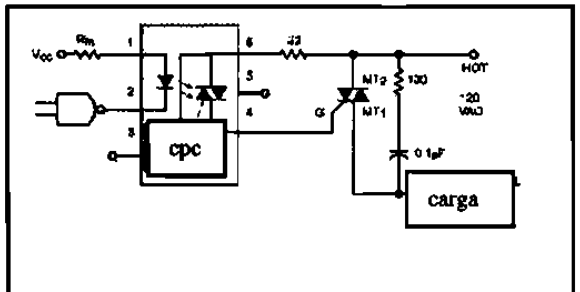


Figura 2.4.18 Foto Triac

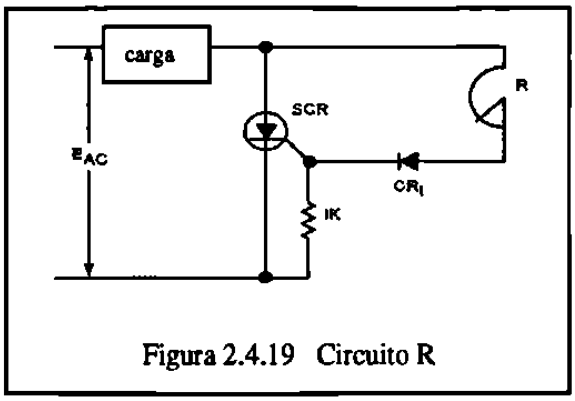


Figura 2.4.19 Circuito R

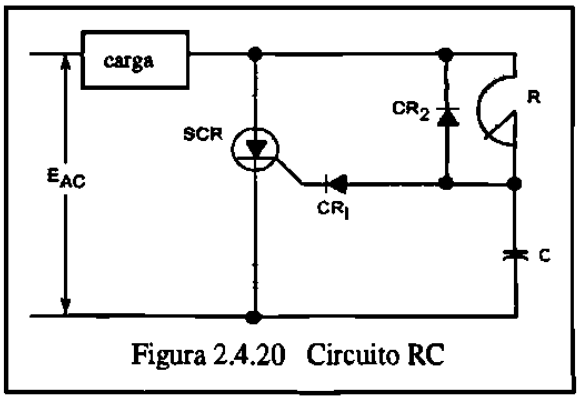


Figura 2.4.20 Circuito RC

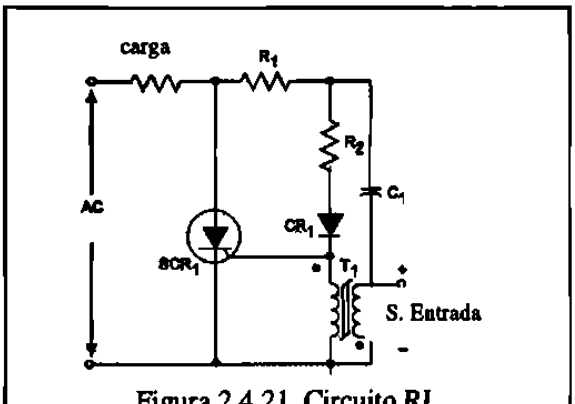


Figura 2.4.21 Circuito RL

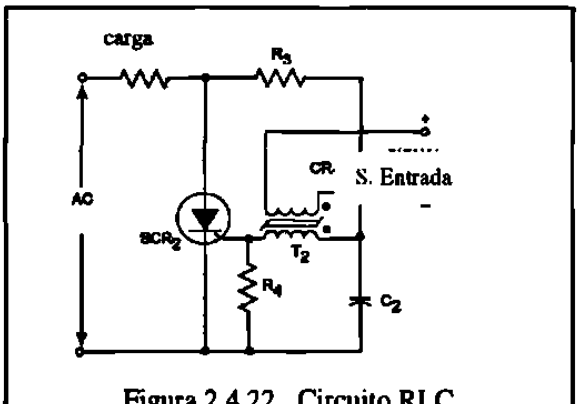


Figura 2.4.22 Circuito RLC

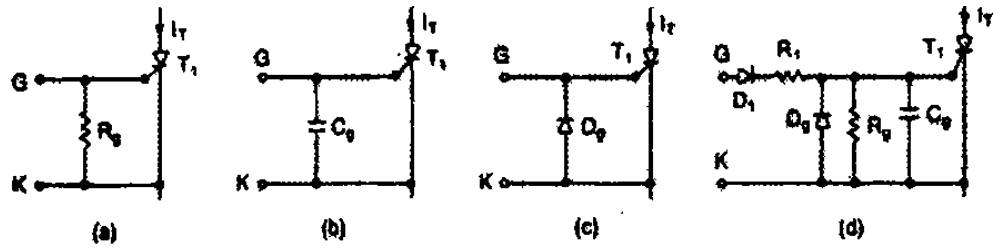


Figura 2.4.23 Típicos

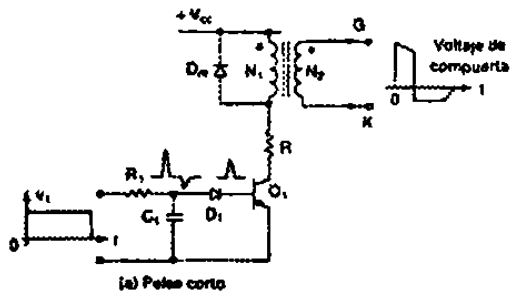


Figura 2.4.24 Pulso corto de un SCR

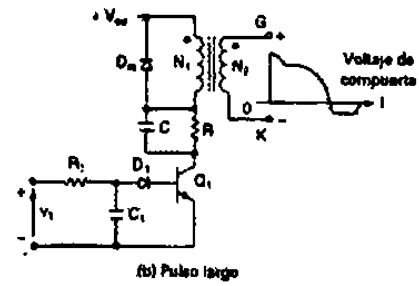


Figura 2.4.25 Pulso largo de un SCR

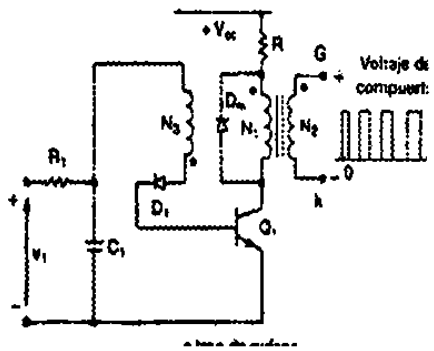


Figura 2.4.26 Generador de tren de pulsos de un SCR

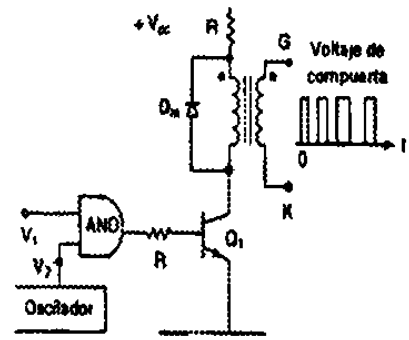


Figura 2.4.27 Tren de pulsos mecanismo de tiempo y lógica AND

2.4.4 Tiristores conectados en serie o en paralelo

Tal como se trató el tema de diodos en serie y en paralelo, para el manejo de más corriente y voltaje, es necesario proteger los elementos de potencia de los convertidores o rectificadores controlados para evitar que se activen involuntariamente o que se dañen por los transitorios de voltaje y de corriente aquí lo aplicaremos en forma similar a como se trabajo con los diodos.
A continuación se presentan gráficas y circuitos, además de algunos problemas donde calculamos los elementos necesarios para la protección bien sea de di/dt o bien dv/dt.

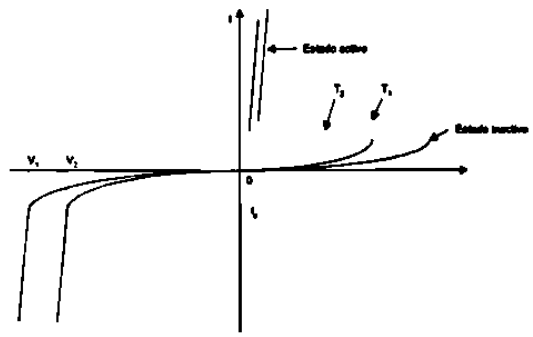


Figura 2.4.28 Activación y V-I

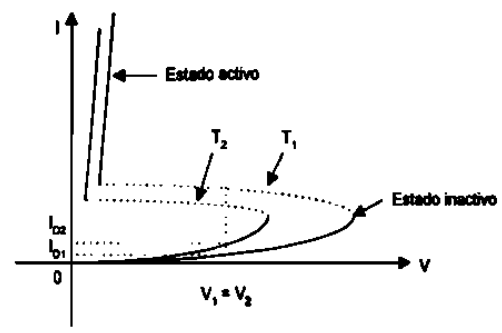


Figura 2.4.29 Activación D1 y D2

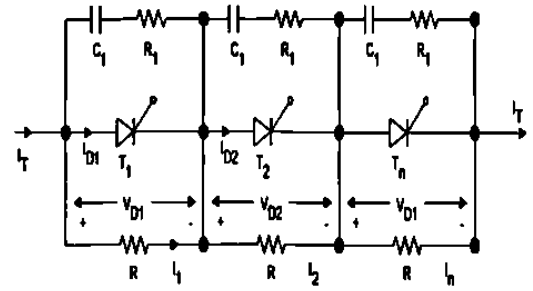


Figura 2.4.30 SCR en serie

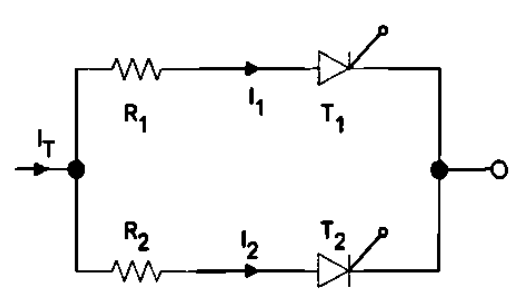


Figura 2.4.31 SCR en paralelo

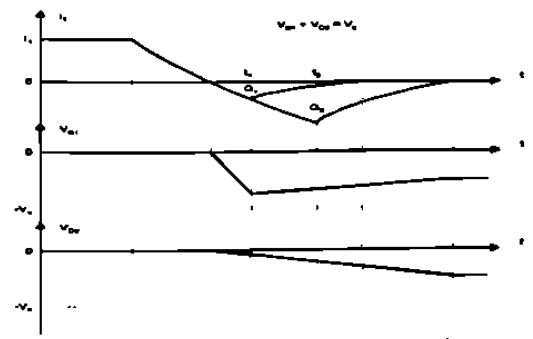


Figura 2.4.32 Curvas recuperación

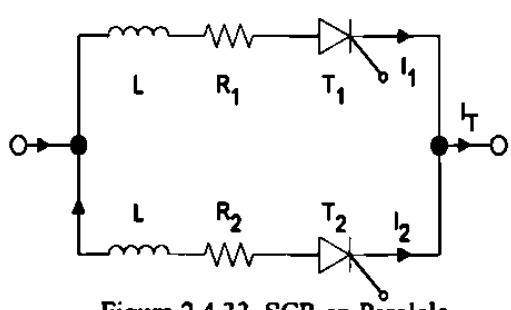
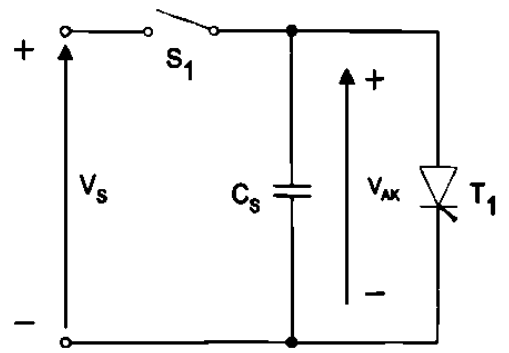
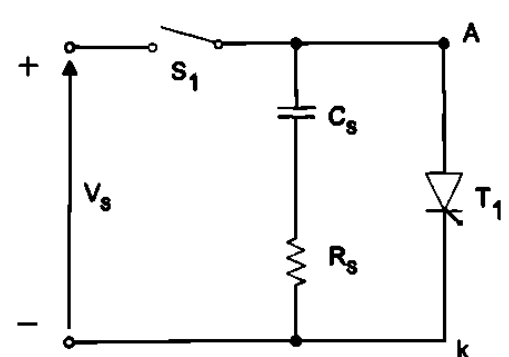


Figura 2.4.33 SCR en Paralelo con protección



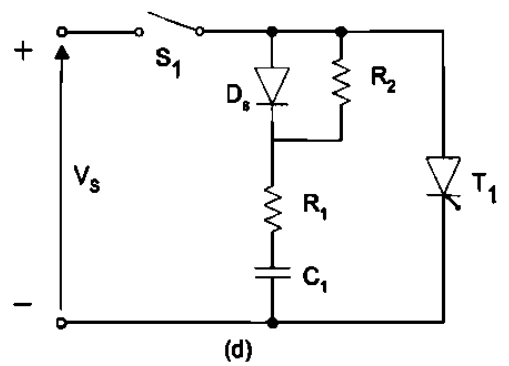
(a)

Figura 2.4.34 Protección C



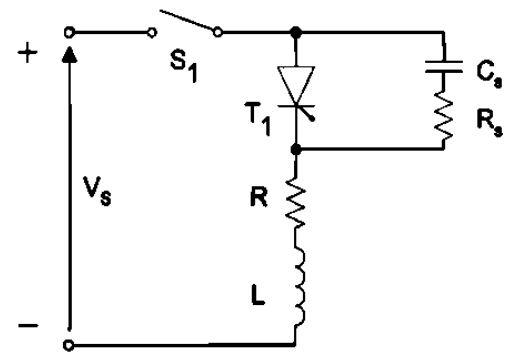
(b)

Figura 2.4.35 Protección RC



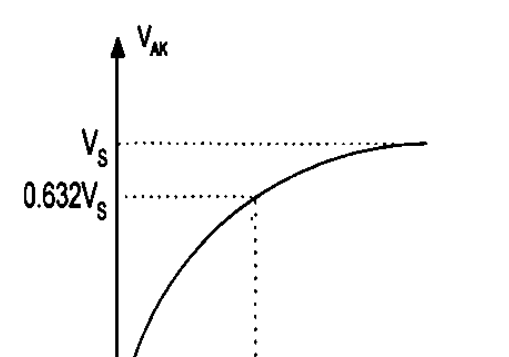
(d)

Figura 2.4.36 Protección Ds RC



(e)

Figura 2.4.37 Protección Ds RCL



(c)

Figura 2.4.38 Curvas de protección

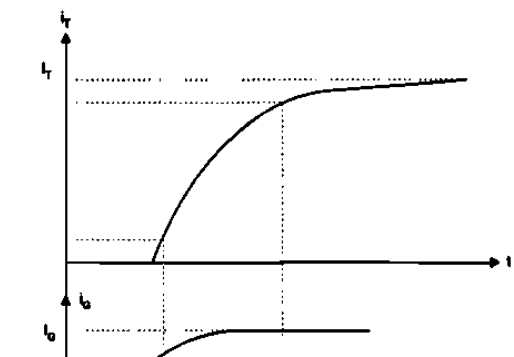


Figura 2.4.39 Curvas de protección

2.4.5 Otros tiristores similares al SCR

A pesar de tener grandes capacidades de manejo de potencia el SCR, conforme ha avanzado la tecnología, se han acrecentado las necesidades a cubrir, como es el caso de tener un elemento que podamos activar y desactivar cuando se requiera, otra necesidad es la de que tenga una velocidad de activación mayor.

A continuación se presentan representaciones esquemáticas para explicar y comparar estos elementos con el SCR que lo superan en algunas funciones pero que a la fecha no cubren las capacidades de potencia de este.

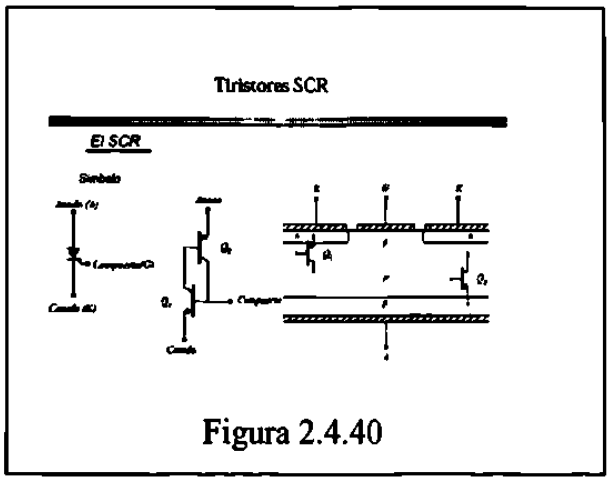


Figura 2.4.40

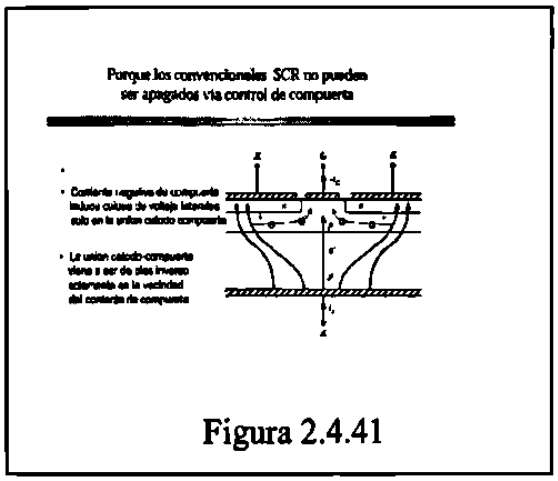


Figura 2.4.41

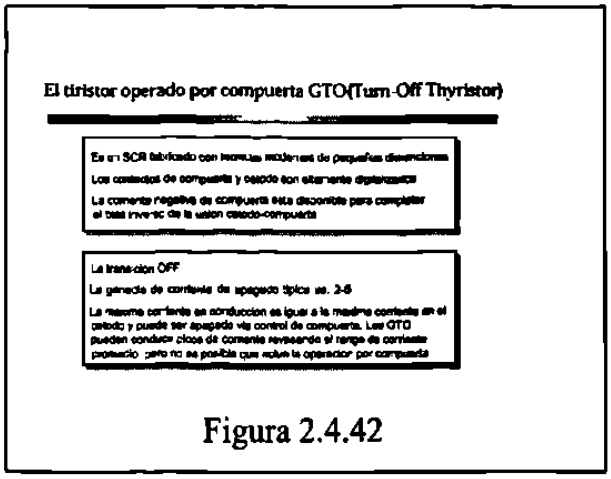


Figura 2.4.42

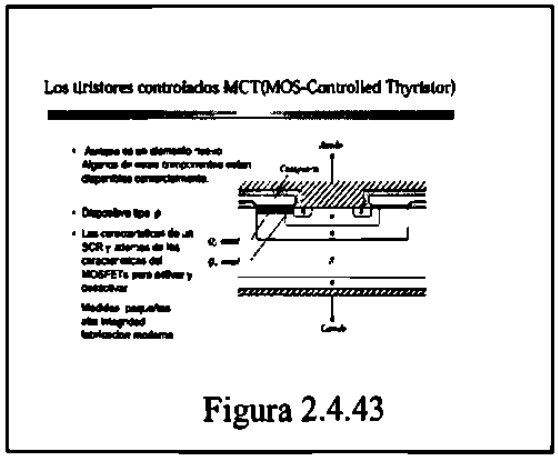


Figura 2.4.43

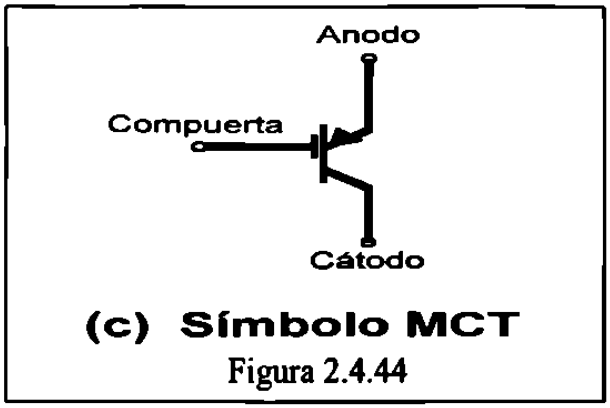


Figura 2.4.44

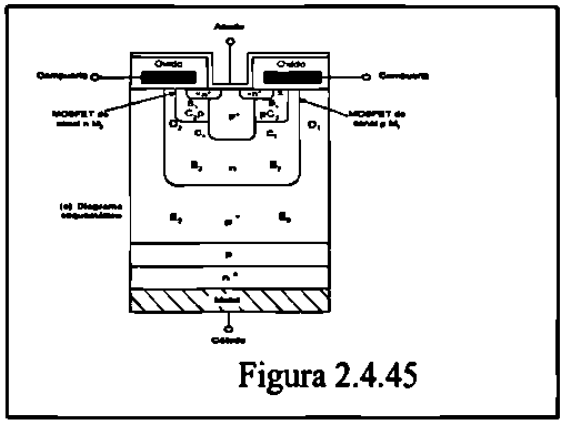


Figura 2.4.45

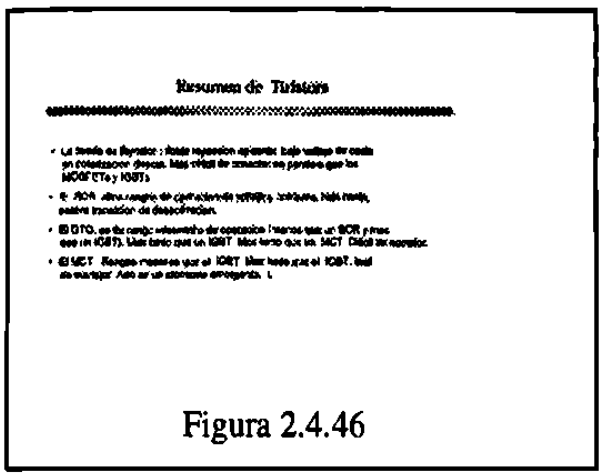


Figura 2.4.46

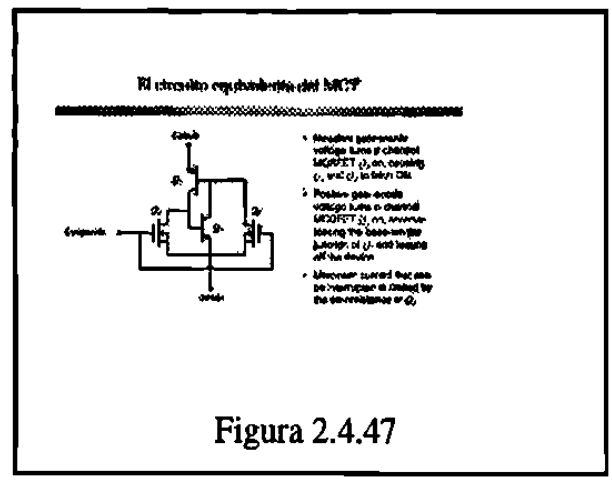


Figura 2.4.47

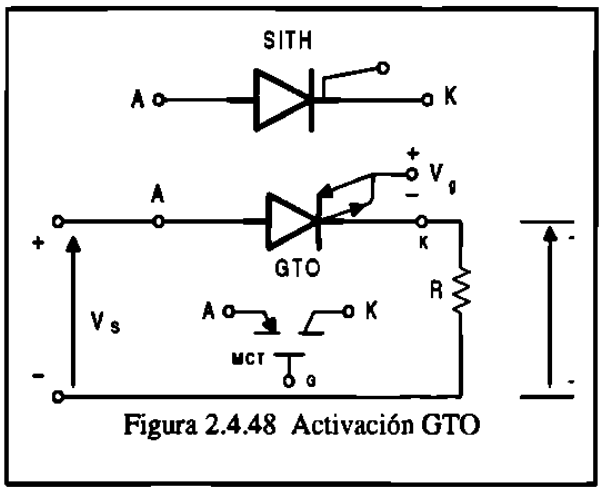


Figura 2.4.48 Activación GTO

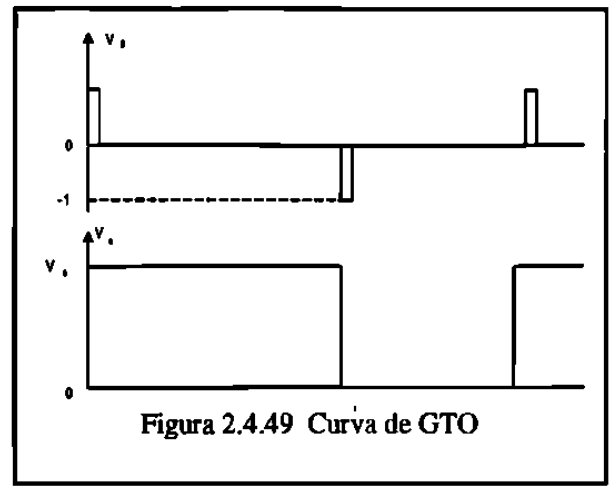


Figura 2.4.49 Curva de GTO

2.4.6 Elementos que generan señal para activar los Tiristores

Dentro de estos tipos de elementos, hay una variedad considerable, pero de las que analizamos aquí son el PUT que son los mas ampliamente actualizados y que aún se encuentran en venta, ya que la tendencia es a generar la señal de compuerta con otros tipos de dispositivos, tales como microprocesadores o algún otro tipo de dispositivos semiconductor integrado.

Aquí analizamos términos como son: I_{pico}, I_{valle}, V_{pico}, V_{valle}, región de corte, región de resistencia negativa, región de saturación, región de neutralización o equilibrio, y además se analizaran los circuitos típicos de aplicación de estos elementos y se presentan problemas para calcular de elementos o utilizar en circuitos.

Enseguida se presentan gráficas de los símbolos de elementos, circuitos y problemas típicos.

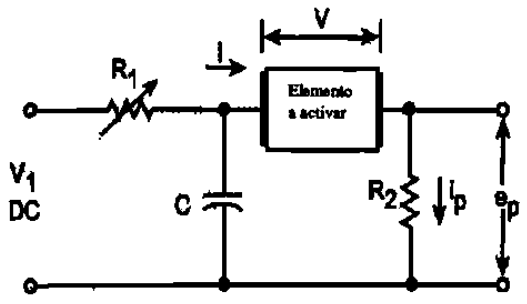


Figura 2.4.50 Típico de activación

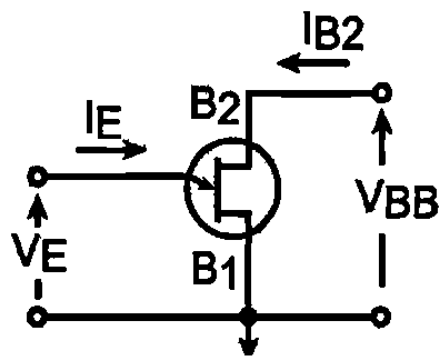


Figura 2.4.51 Símbolo UJT

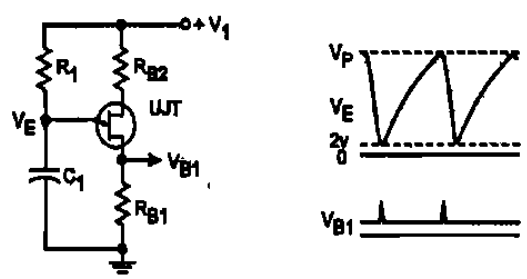


Figura 2.4.52 Circuito UJT

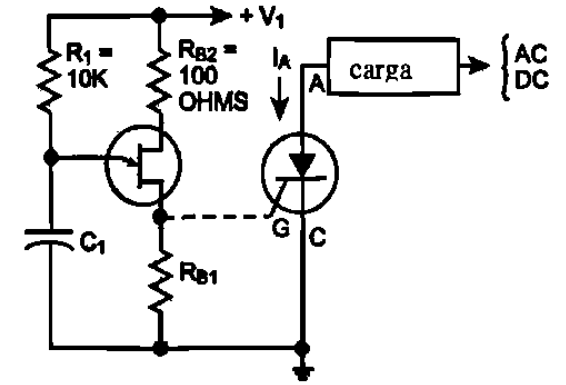


Figura 2.4.53 Aplicación UJT

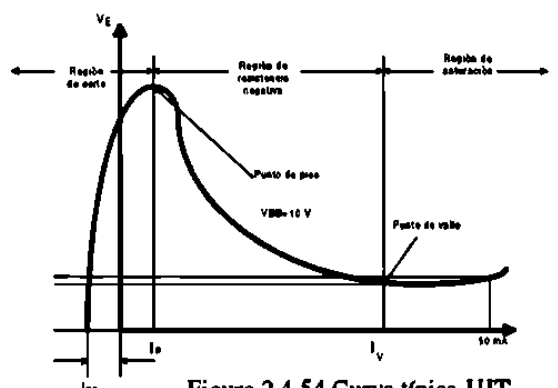


Figura 2.4.54 Curva típica UJT

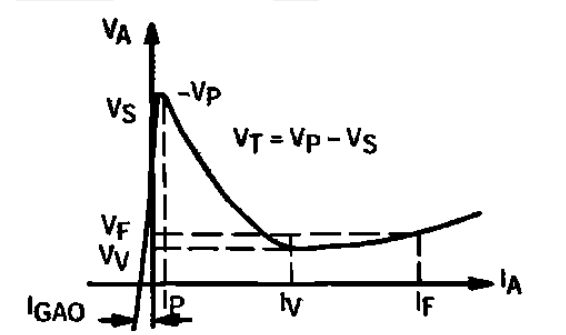


Figura 2.4.55 Curva típica

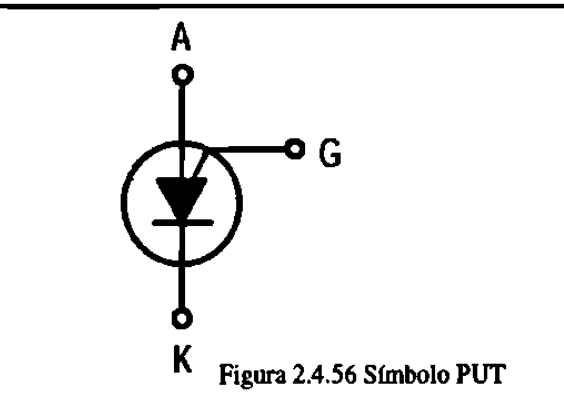


Figura 2.4.56 Símbolo PUT

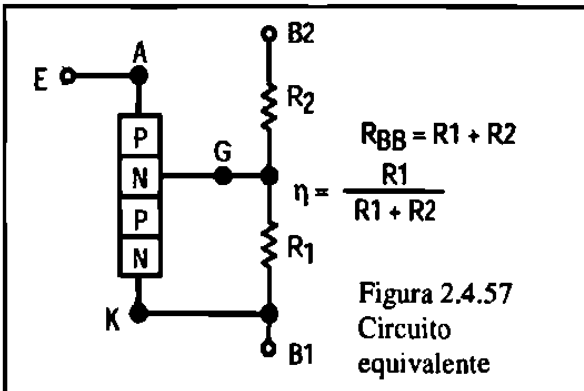


Figura 2.4.57 Circuito equivalente

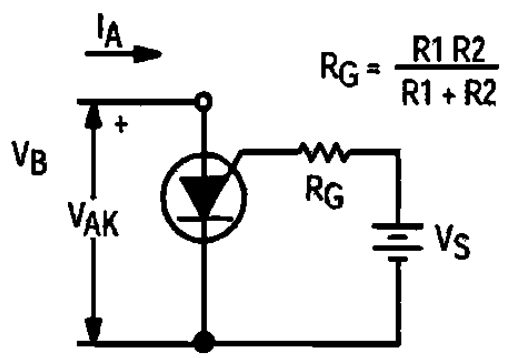


Figura 2.4.58 Circuito para pruebas

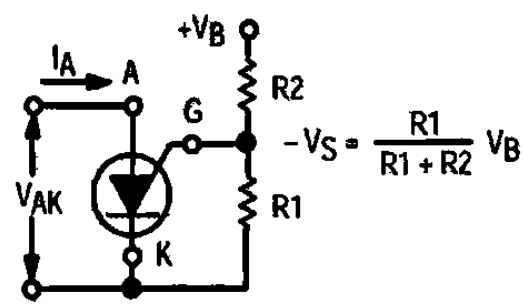


Figura 2.4.59 Circuito para pruebas

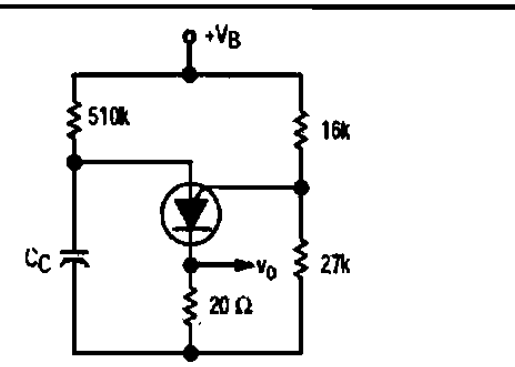


Figura 2.4.60 Oscilador PUT

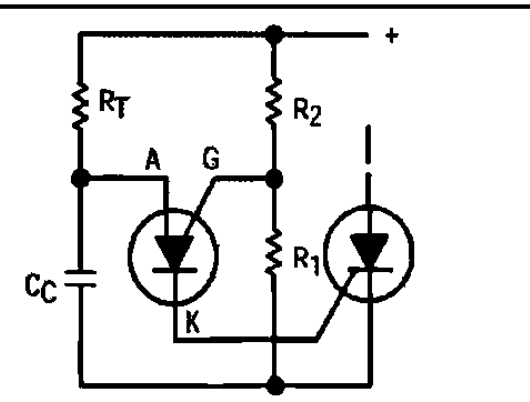


Figura 2.4.61 Aplicación

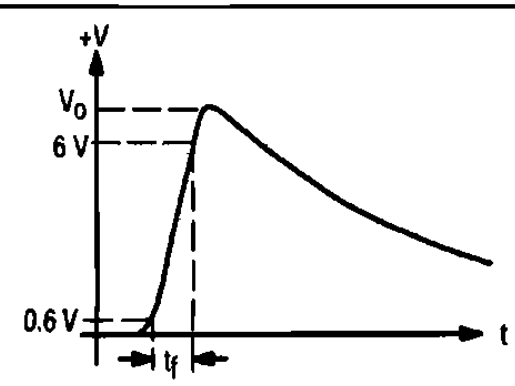


Figura 2.4.62 Curva

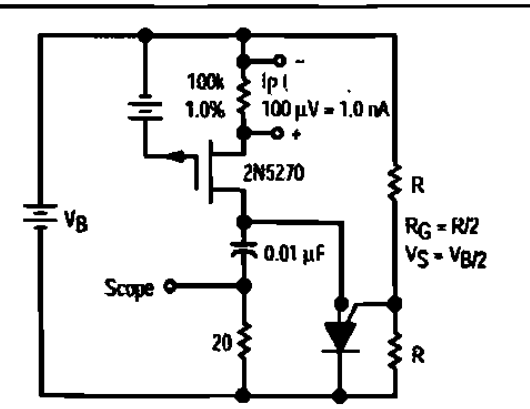


Figura 2.4.63 Configuración con carga

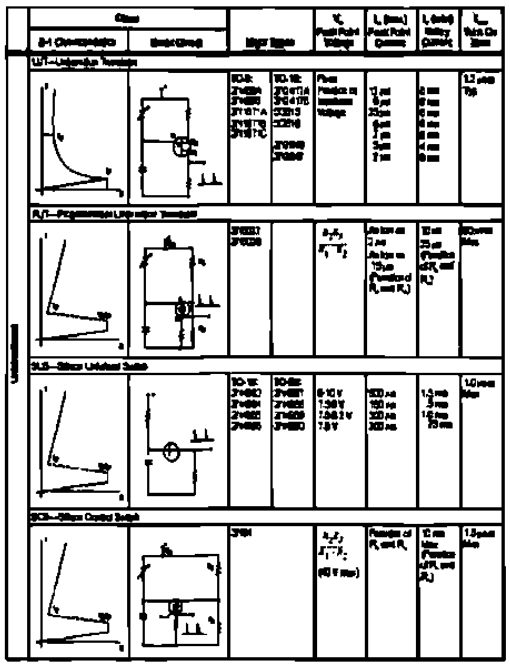


Tabla 2.4.64 Comparación uno

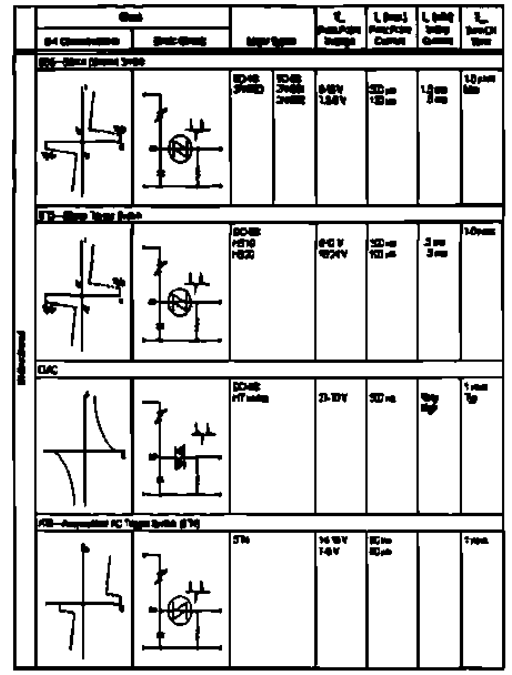


Tabla 2.4.65 Comparación dos

2.5 CONVERTIDORES

2.5.1 Antecedentes

Al igual que en los otros temas debemos de tener algunas clasificaciones y consideraciones para una mejor comprensión. Cuando vemos el tema de diodos y posteriormente el de rectificación, se comento que era del tipo no controlado.
En este tema que trataremos que es el de convertidores de fase analizaremos la rectificación controlada en la que podemos controlar el ángulo de conducción para obtener la potencia deseada.

2.5.2 Clasificación y consideraciones

Referente a la clasificación, podemos tener rectificación monofásica y trifásica de ½ y onda completa. Con la ventaja actual de retrazar el ángulo de activación. Dentro de la clasificación de acuerdo a su operación con la corriente y el voltaje tenemos tres tipos de curva, que son:

- Curva de un cuadrante es el que opera en I + V +
- Curva de dos cuadrantes son los que operan en I + V + y V –
- Curva de cuatro cuadrantes son los que operan en I + y I – V + y V –

Dentro de las consideraciones se tiende a estimar, que la inductancia de la carga es tan grande que la corriente, en esta, no tiene componentes ondulatorios y de esta forma nos evitamos hacer cálculos con series de Fourier, esto ultimo en los convertidores de dos y cuatro cuadrantes

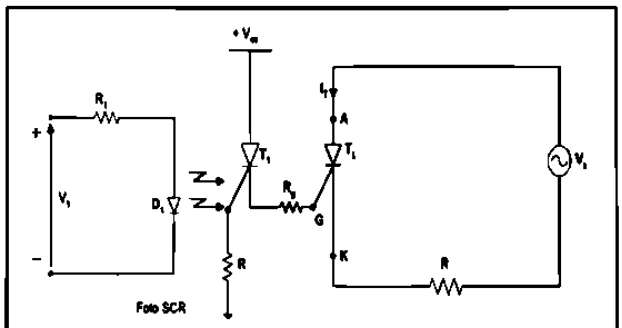


Figura 2.5.1 Convertidor

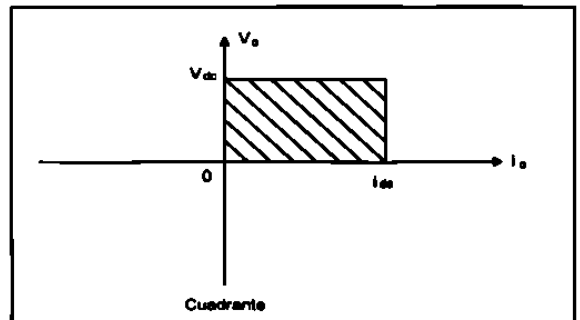


Figura 2.5.2 Grafica un cuadrante

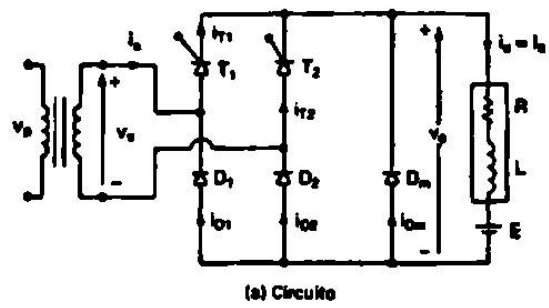


Figura 2.5.3 Convertidor de un cuadrante

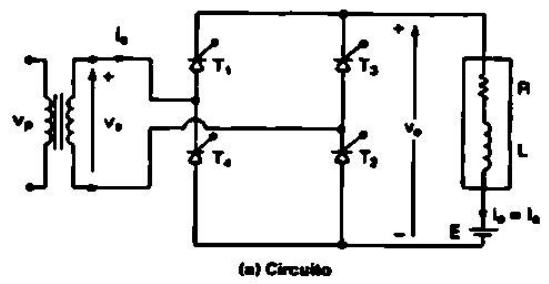


Figura 2.5.4 Convertidor de dos cuadrante

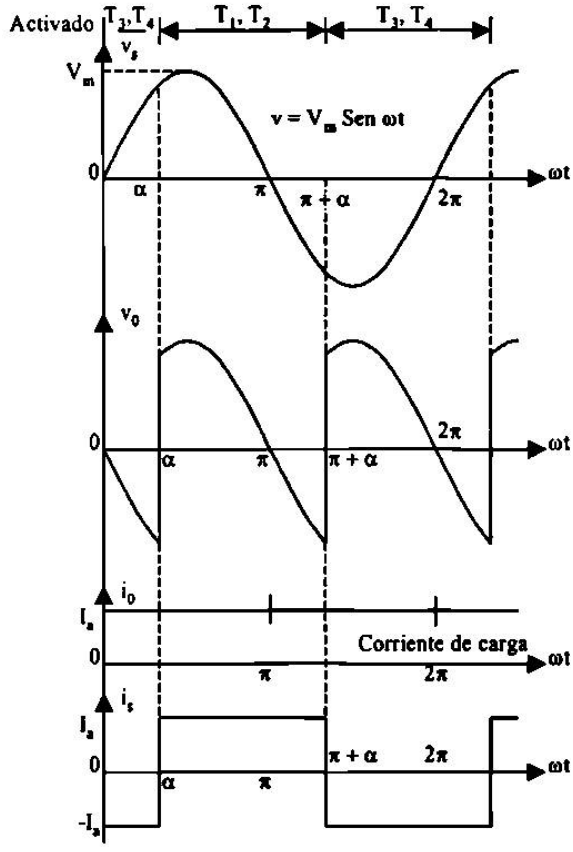


Figura 2.5.7 Curvas

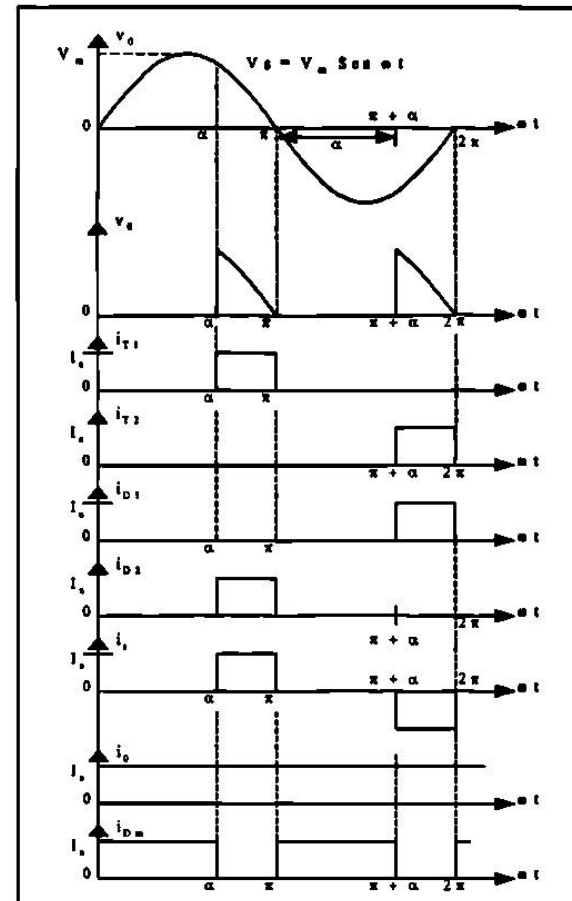


Figura 2.5.5 Curvas típicas

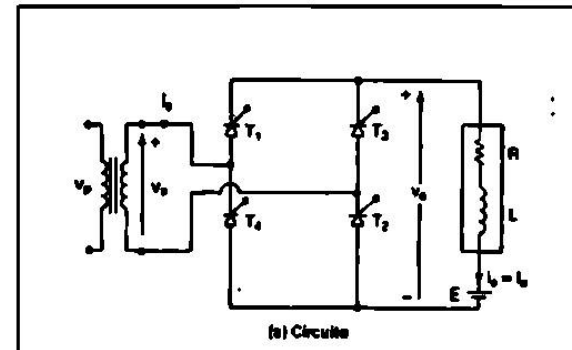


Figura 2.5.6 Convertidor de dos cuadrante

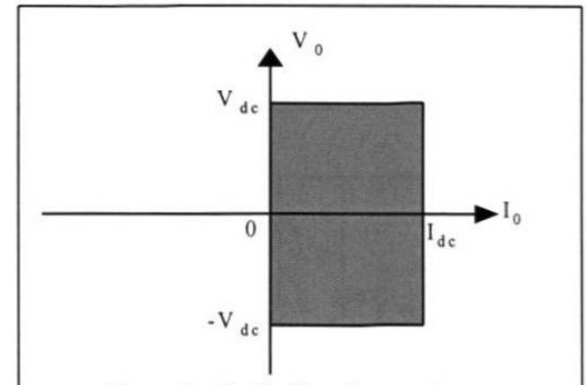


Figura 2.5.8 Grafica dos cuadrante

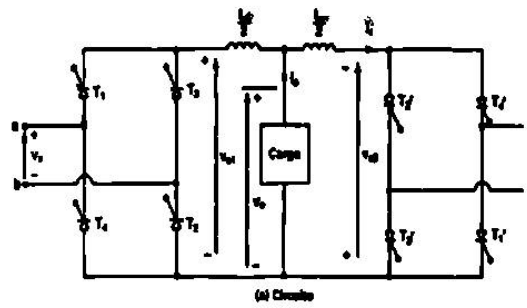


Figura 2.5.9 Convertidor 4 cuadrantes

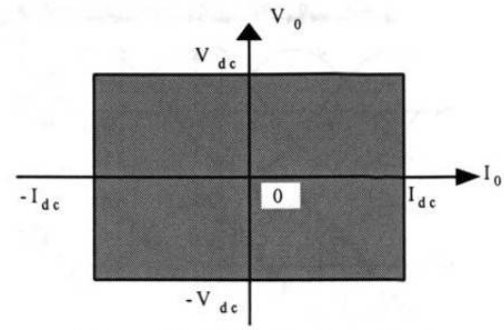


Figura 2.5.10 Grafica 4 cuadrantes

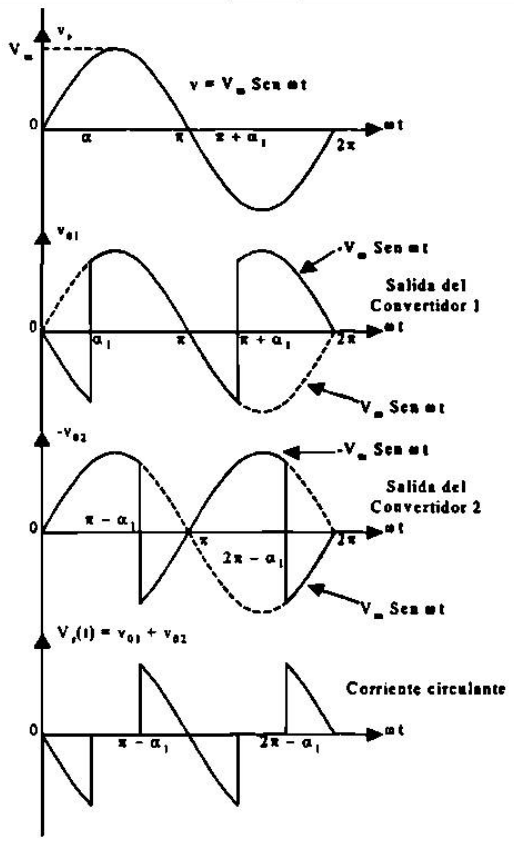


Figura 2.5.11 Curvas 4 cuadrantes

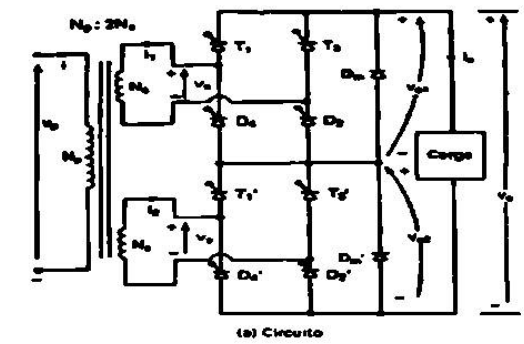


Figura 2.5.12 Serie 1 cuadrantes

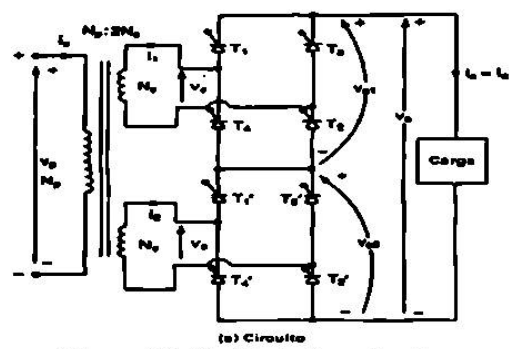


Figura 2.5.13 Serie 2 cuadrantes

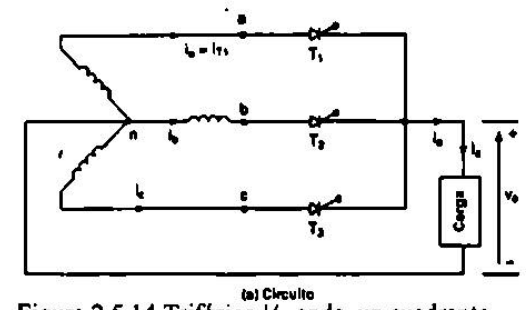


Figura 2.5.14 Trifásico ½ onda un cuadrante

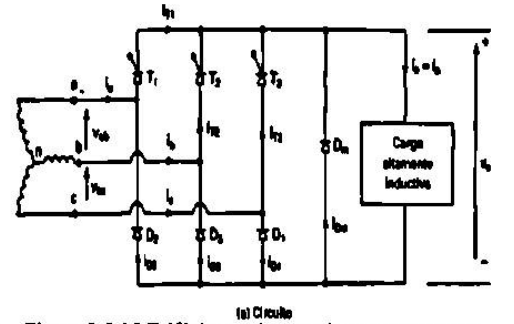


Figura 2.5.15 Trifásico onda completa un cuadrante

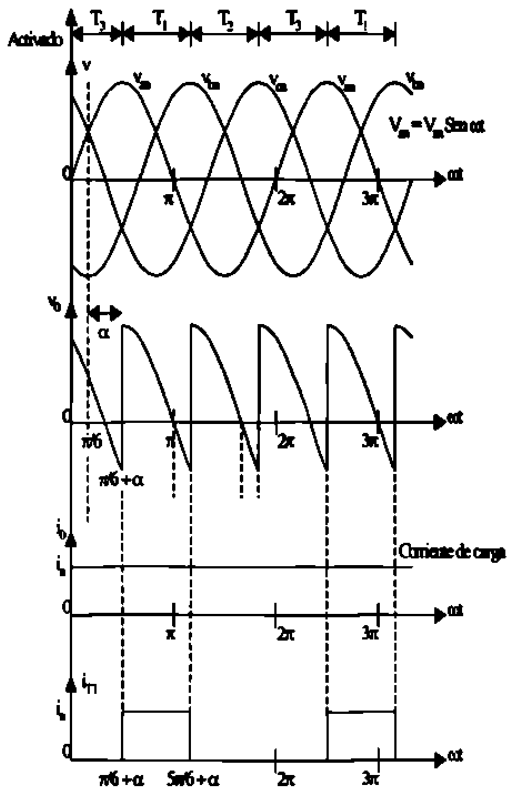


Figura 2.5.16 Curvas trifásico 2

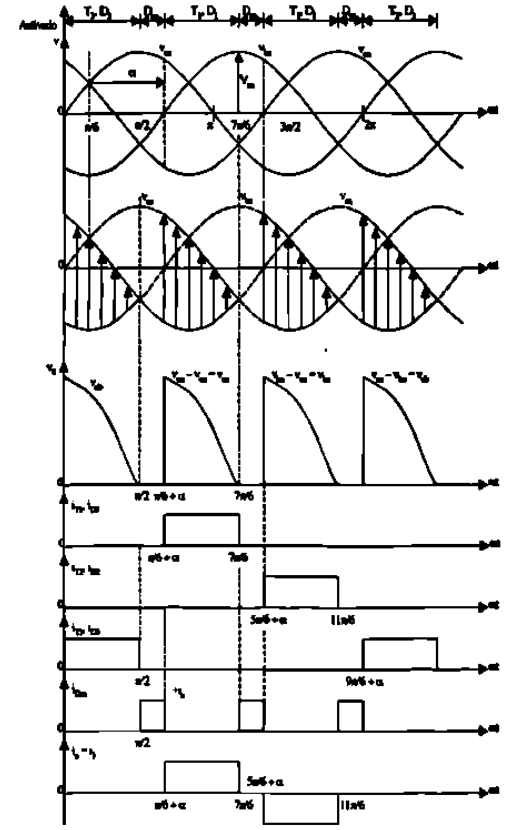


Figura 2.5.17 Curvas trifásico un cuadrante

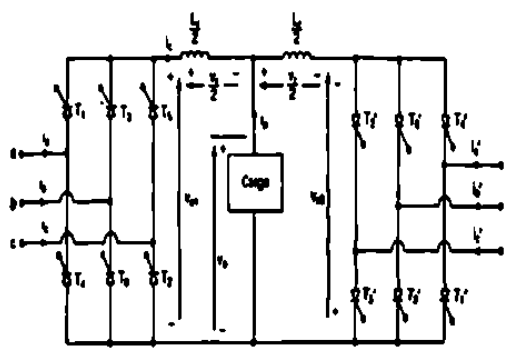


Figura 2.5.18 Convertidor Dual trifásico

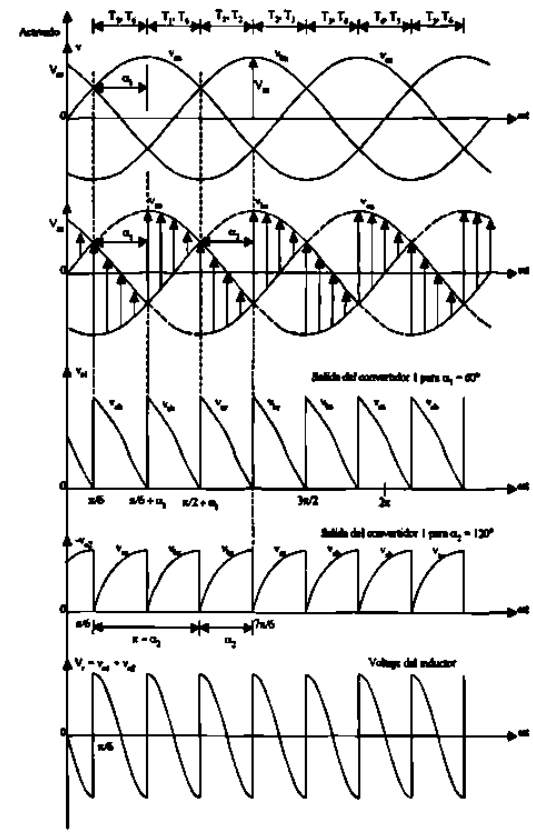


Figura 2.5.19 Curvas dual

2.5.3 Otros Tiristores y circuitos de control en convertidores

Como ya lo vimos en el tema de tiristores el retraso en el ángulo de conducción nos ocasiona armónicas dentro y fuera del equipo a operar, además de disminuir el FP y para mejorar estos factores , uno de los procedimientos es el uso de tiristores. Con características mejoradas como son: GTO, MCT, SITH.

Los procedimientos que se utilizaron son: el de ángulo de extinción, el de ángulo conducción, modulador de ancho de pulso y el modulador senoidal de ancho de pulso. Cada uno de estos es más simple observándolo y comprenderlo en las siguientes figuras. Además en estos sistemas de control, es necesario aplicar los filtros a la entrada y a la salida, similar a lo que se vio de los filtros en circuitos rectificadores con diodos.

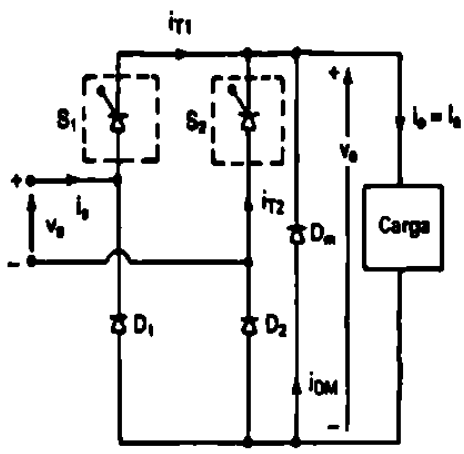


Figura 2.5.20 Modificación un cuadrante

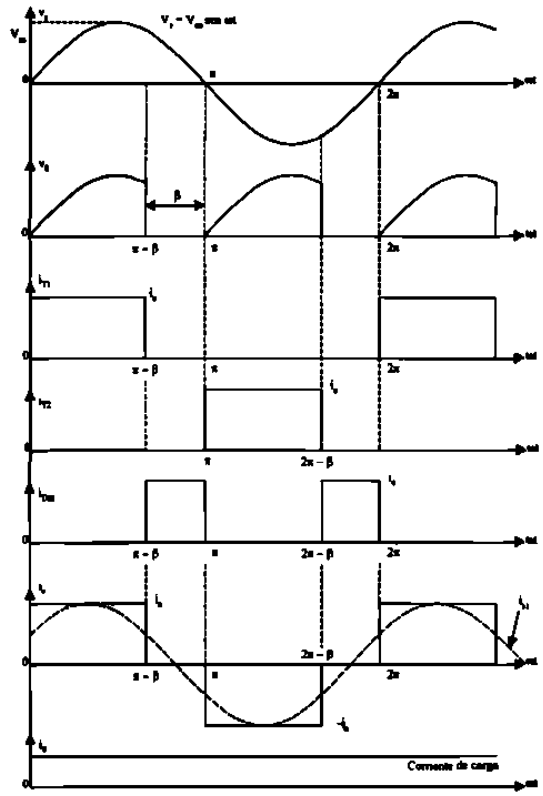


Figura 2.5.21 Curvas un cuadrante

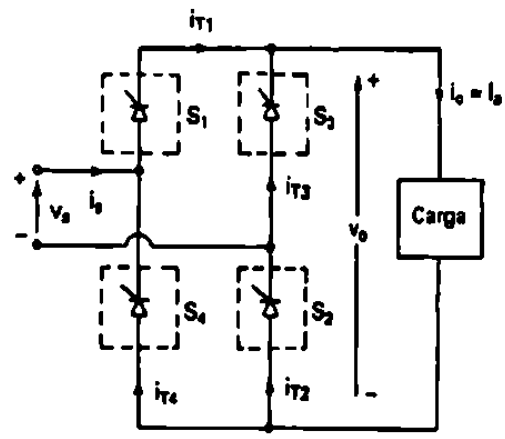


Figura 2.5.22 Monofásico Dos cuadrantes

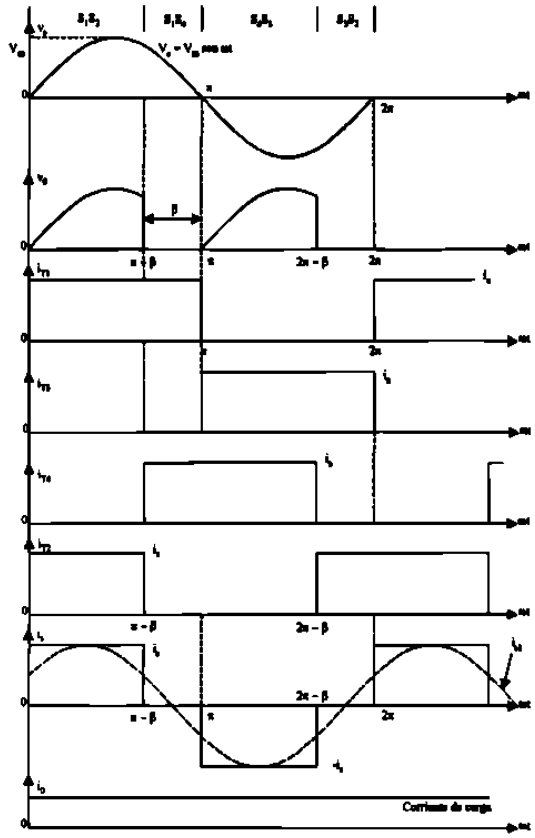


Figura 2.5.23 Curvas dos cuadrantes

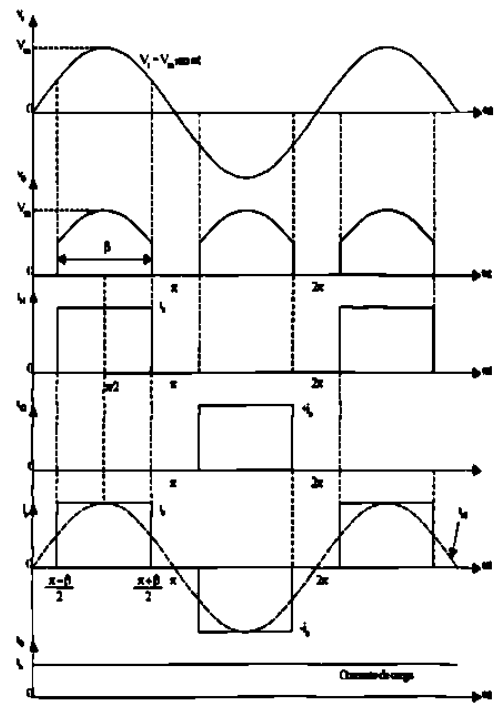


Figura 2.5.24 Mejoras al FP

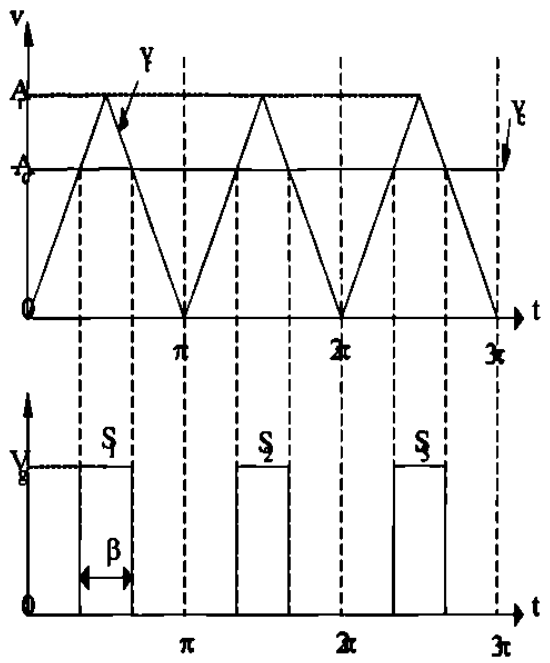


Figura 2.5.25 Mejoras al FP 2

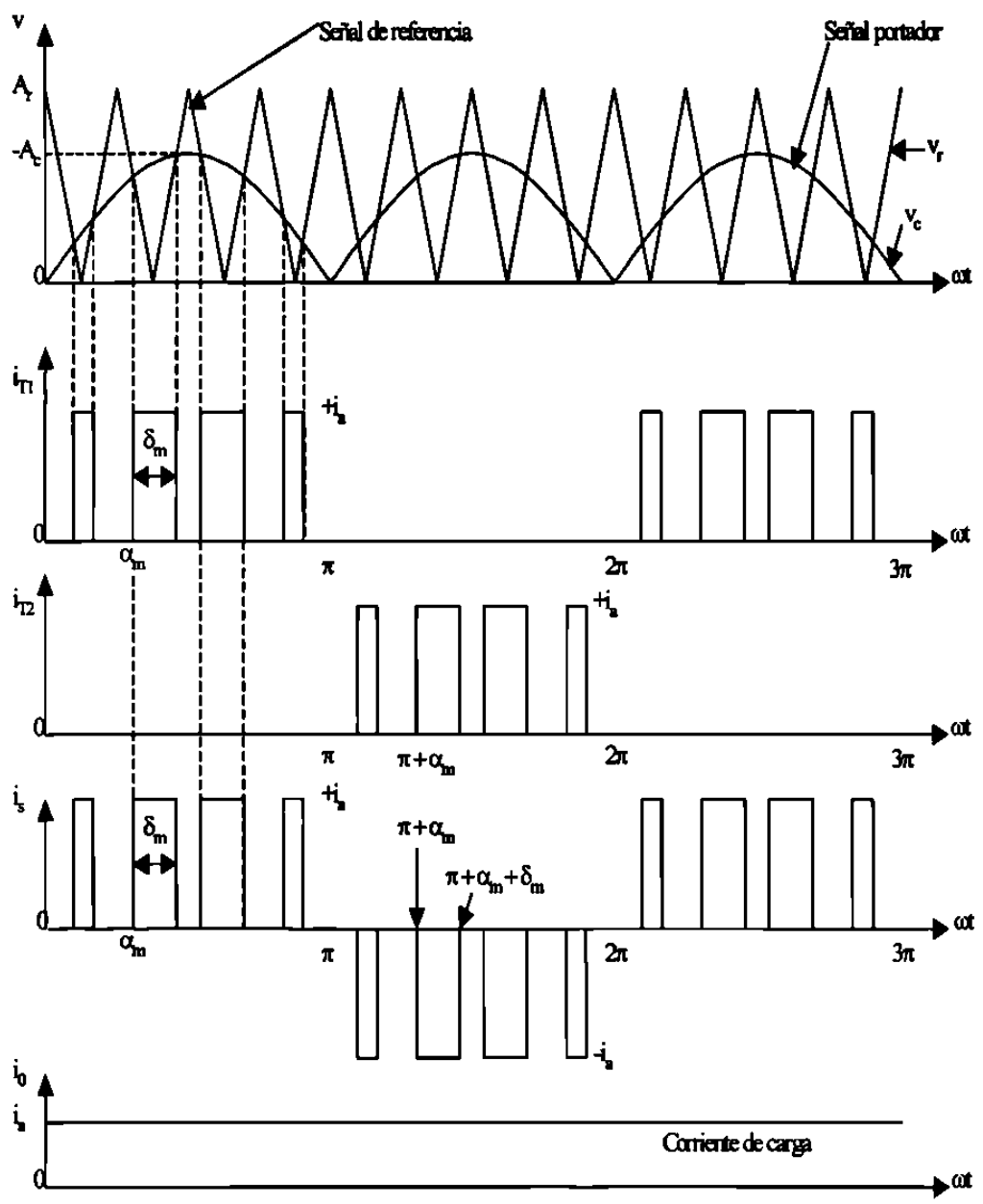


Figura 2.5.26 Control Senoidal del ancho de pulso

2.6 Troceadores (Pulsadores) o Convertidores de CD a CD

2.6.1 Antecedentes.

La finalidad principal de estos circuitos es la de convertir CD a CD, elevación o disminución de voltaje. A diferencia de los convertidores de fase en los pulsadores es necesario utilizar otro tipo de semiconductores y los más aplicados son: MOSFET, IGBT y BJT. Aunque los tiristores también son aplicados. Solo que el SCR requiere un circuito que permita su desactivación.
Los pulsadores en CD son equivalentes al transformador en CA.

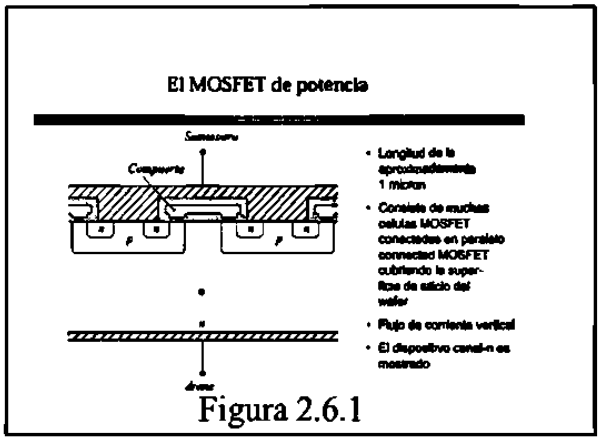


Figura 2.6.1

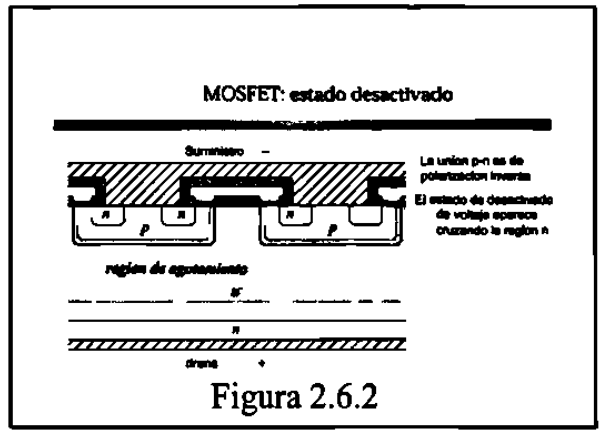


Figura 2.6.2

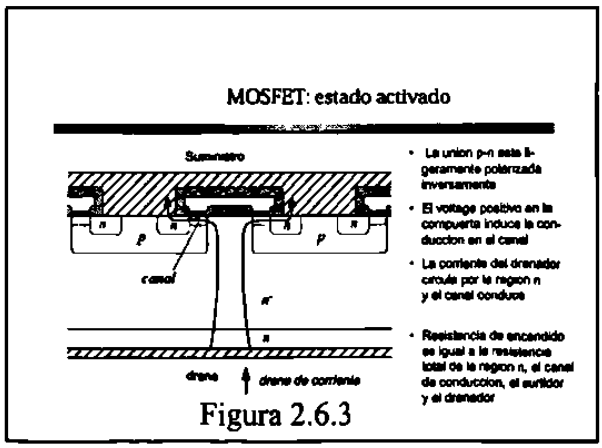


Figura 2.6.3

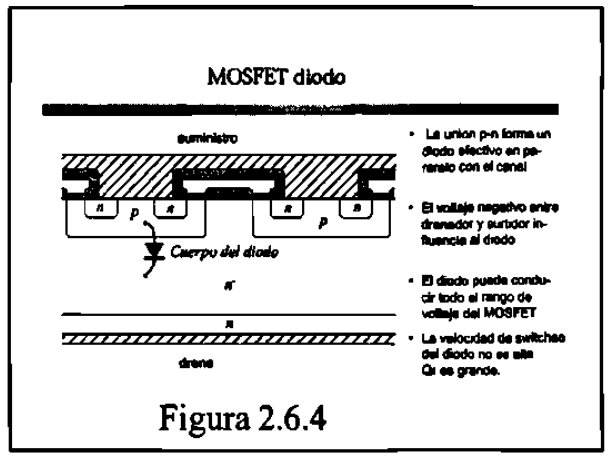


Figura 2.6.4

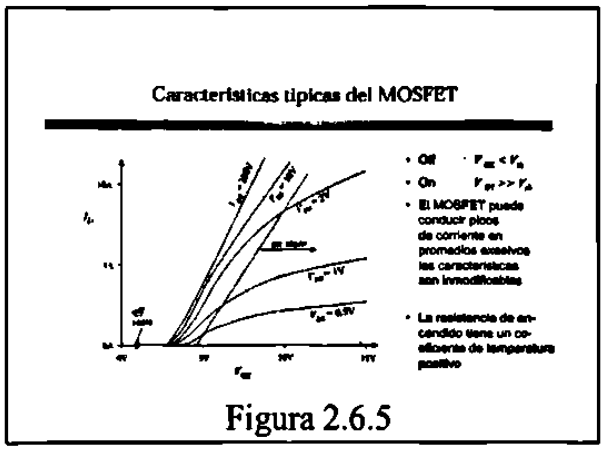


Figura 2.6.5

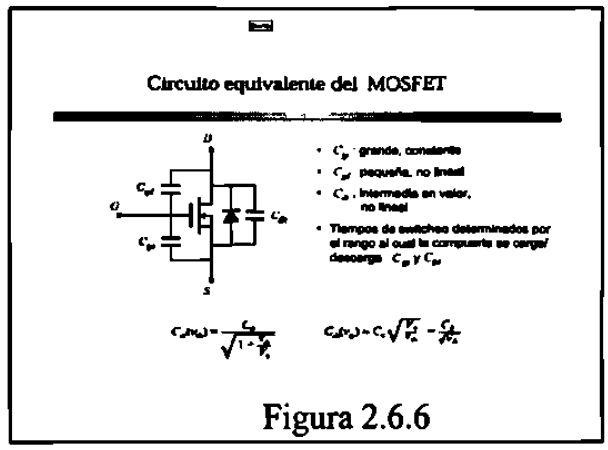


Figura 2.6.6

Características de MOSFETs de potencia comerciales

parte	V_{DS} voltaje	corriente	R	Q_g(típica)
IRF250	40V	30A	0.085Ω	110nC
IRF510	100V	5.6A	0.54Ω	8.3nC
IRF540	100V	28A	0.077Ω	72nC
APT10M11JVR	100V	75A	0.011Ω	171nC
IRF740	400V	10A	0.55Ω	40nC
MTM15N40E	400V	15A	0.3Ω	110nC
APT5012B1VR	500V	23A	0.25Ω	87nC
APT1001RBVR	1000V	11A	1.0Ω	150nC

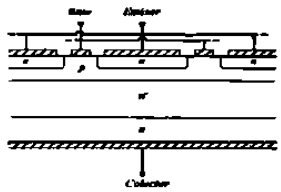
Figura 2.6.7

Conclusiones del MOSFET

- Dispositivo portador de cargas mayoritarias, alta velocidad de switcheo
- Frecuencias típicas de switcheo: decenas y centenas de kHz
- La Resistencia de encendido aumenta rapidamente con el voltaje
- Facil de manejar
- El dispositivo a escoger para bloquear voltajes menores a 500V
- Dispositivos para 1000V estan disponibles, pero son utiles a potencias bajas (100W)
- El numero de parte es seleccionado mas por sus resistencias que por la capacidad de corriente.

Figura 2.6.8

Transistor de union bipolar (BJT)



- Emisor y base interdigitadas
- Flujo de corriente vertical
- Dispositivo npn
- Disp. portadores minoritarios
- on-state base-emitter and collector-base junctions are both forward-biased
- on-state substantial minority charge in p and n regions, conductivity modulation

Figura 2.6.9

BJT tiempos de switcheo

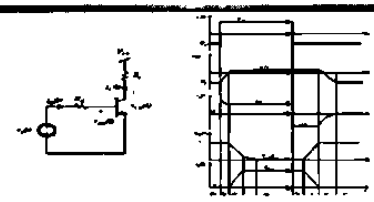


Figura 2.6.10

Formas de onda ideal de corriente base

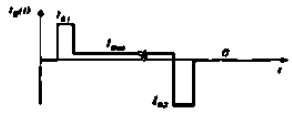
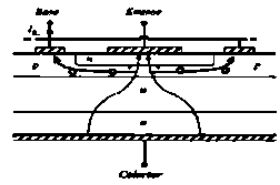


Figura 2.6.11

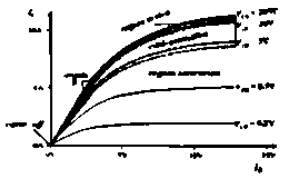
Analisis de exceso de corriente en I_{b2}



Hay formacion de puntos calientes y el elemento puede fallar

Figura 2.6.12

Caracteristicas BJT



- Off $I_B = 0$
- On $I_B > I_C/\beta$
- La ganancia de corriente β decrementa rapidamente en altas corrientes.
  El elemento no debe ser operado encorrientes que excedan el rango permitido del elemento.

Figura 2.6.13

Voltages de quiebre

BV_{CBO} Voltaje de avalanche de la union base-colector con el emisor del circuito abierto

BV_{CEO} Voltaje colector-emisor con cero corriente en la base

BV^{+}_{CEO} Voltaje de quiebre observado con corriente positiva en la base

En la mayoria de las aplicaciones en el estado de apagado del transistor no debera de excedar BV_{CEO}

Figura 2.6.14

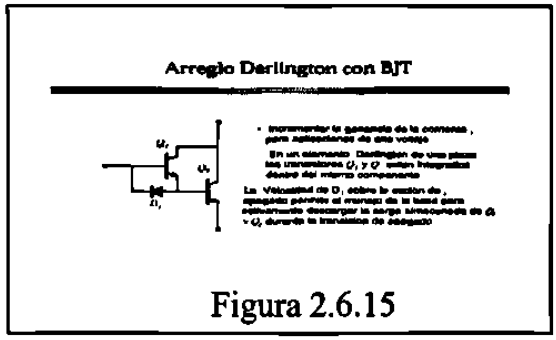


Figura 2.6.15

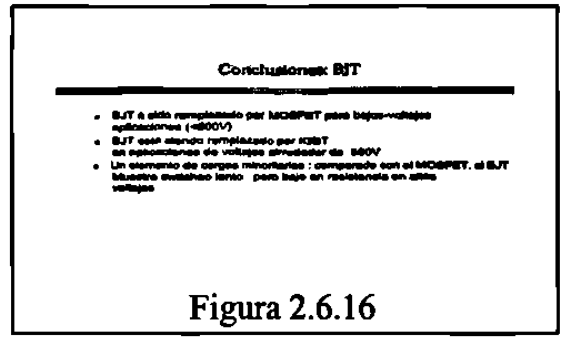


Figura 2.6.16

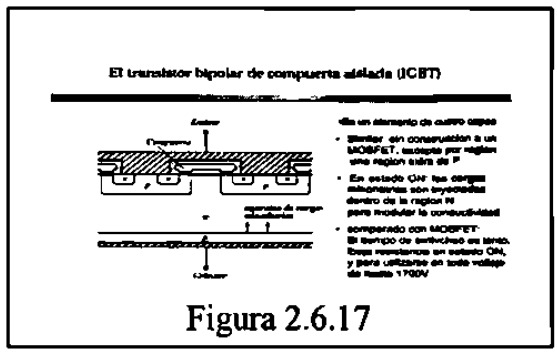


Figura 2.6.17

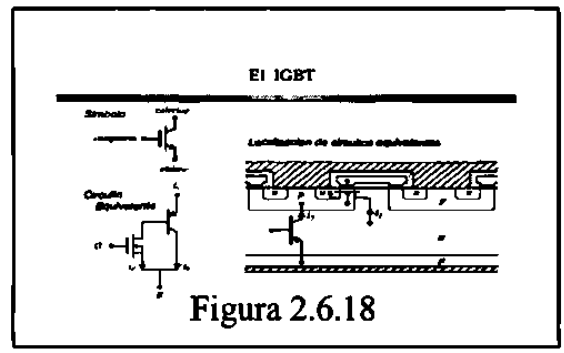


Figura 2.6.18

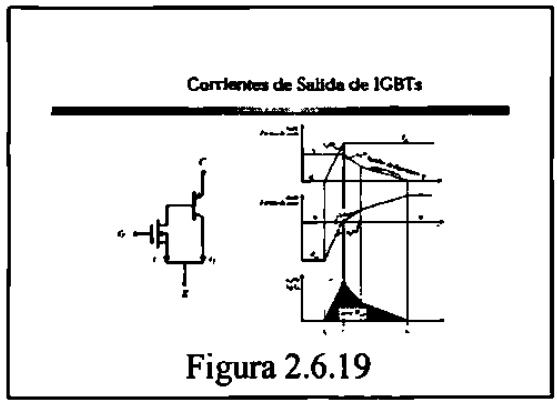


Figura 2.6.19

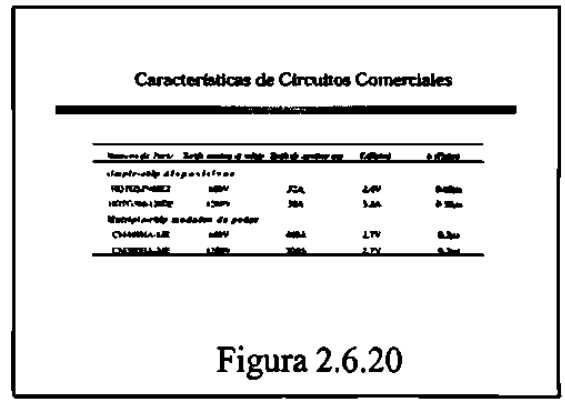


Figura 2.6.20

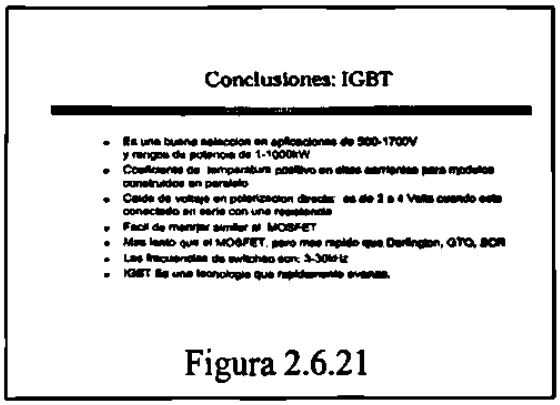


Figura 2.6.21

2.6.2 Operación y clasificación.

Los pulsadores son circuitos alimentados con CD, y lo que entregan a la carga o salida es CD Pulsante.

Dentro de la clasificación de los pulsadores muy similar a convertidores de fase, aquí tenemos cinco tipos diferentes que son: A, B, C, D, E. Los cuales explicaremos con circuitos gráficos. Los tipos de conexión de cada elemento semiconductor utilizado para que opere en el tipo de pulsador que se utiliza.

Como la tendencia es que a gran cantidad de equipos con dispositivos basados en microprocesadores que lo que operan son pequeñas señales las que fácilmente pueden activar un interruptor, de estado sólido.

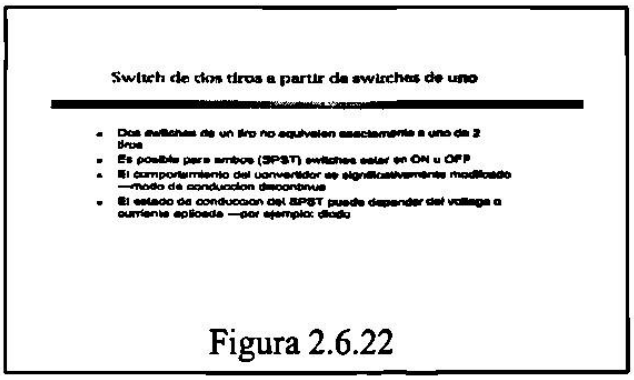


Figura 2.6.22

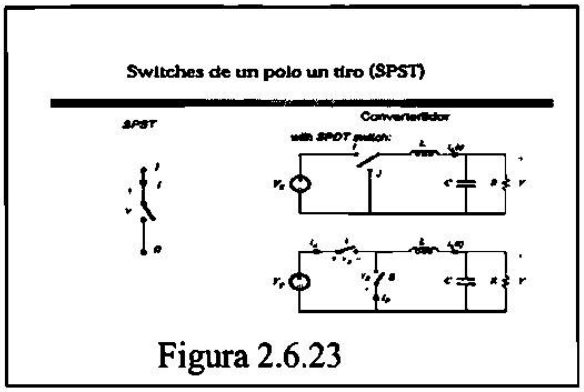


Figura 2.6.23

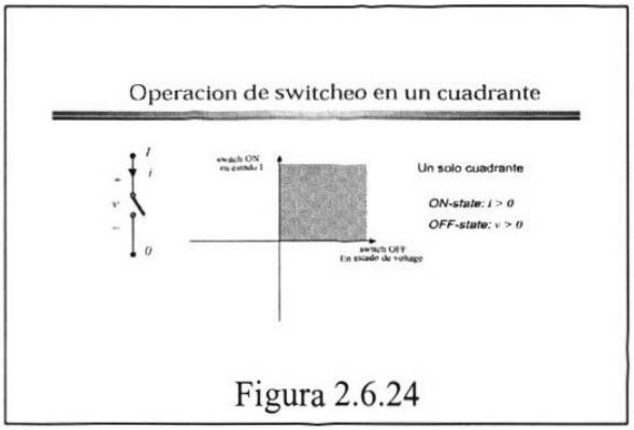


Figura 2.6.24

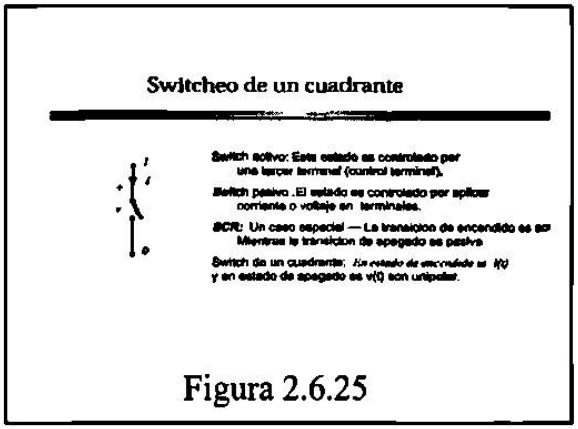


Figura 2.6.25

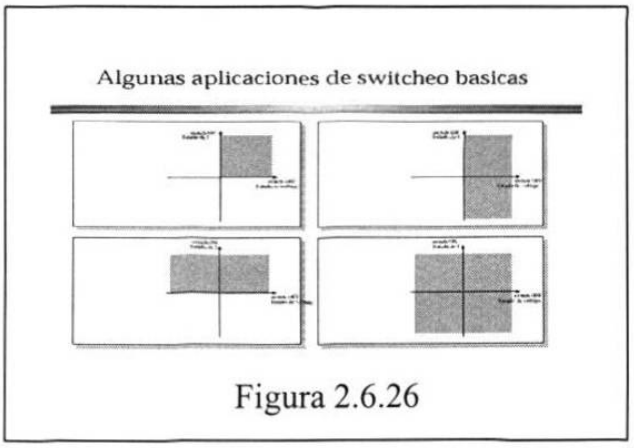


Figura 2.6.26

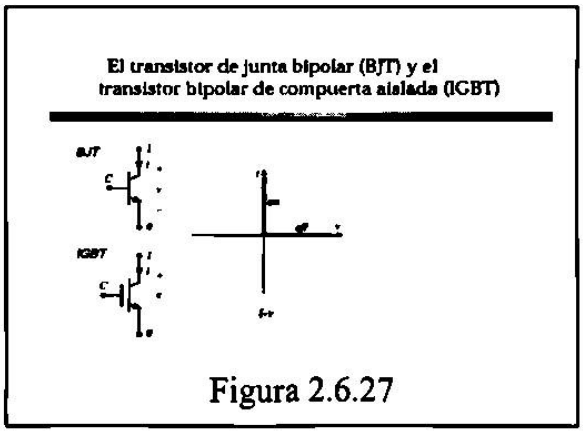


Figura 2.6.27

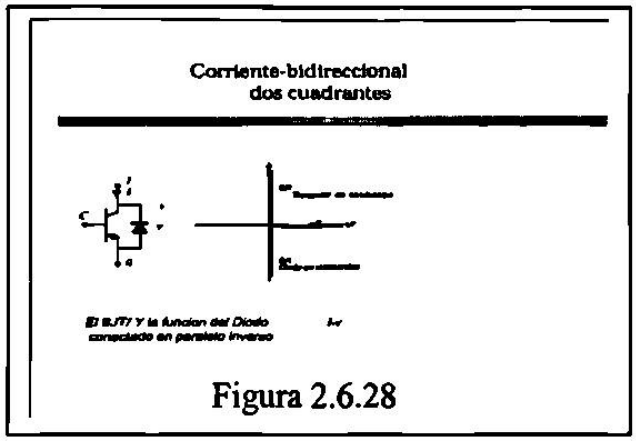


Figura 2.6.28

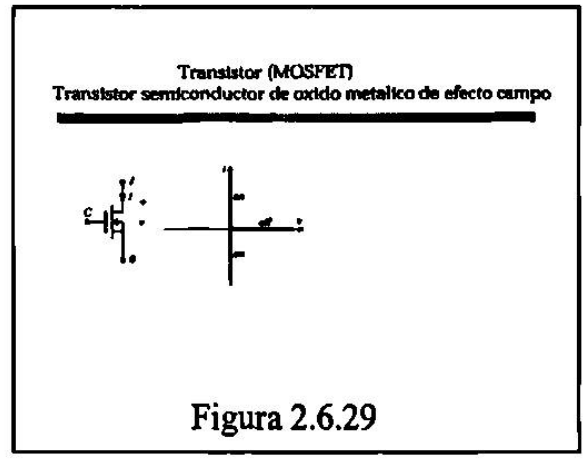


Figura 2.6.29

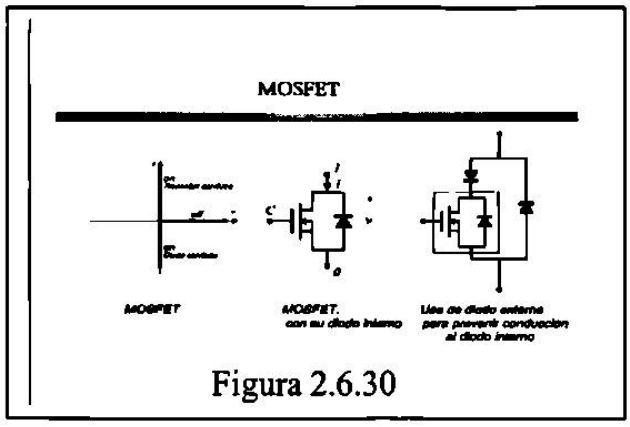


Figura 2.6.30

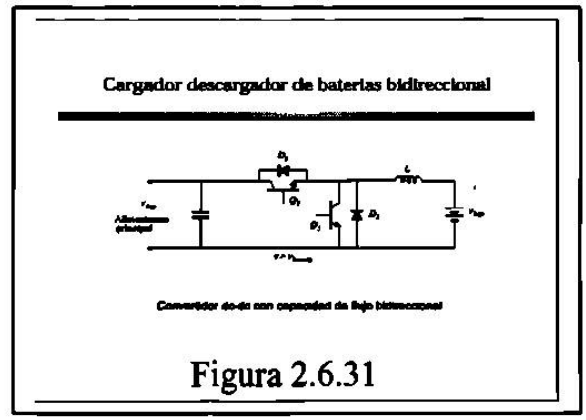


Figura 2.6.31

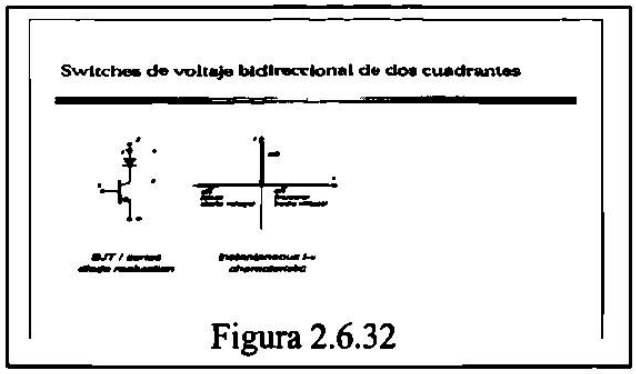


Figura 2.6.32

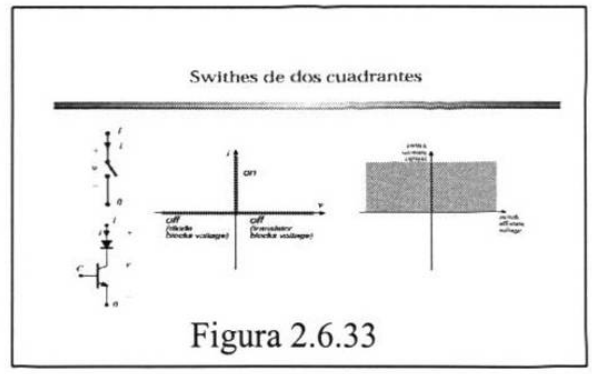


Figura 2.6.33

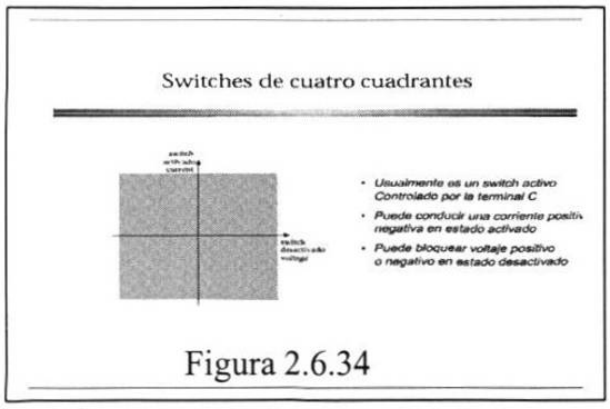


Figura 2.6.34

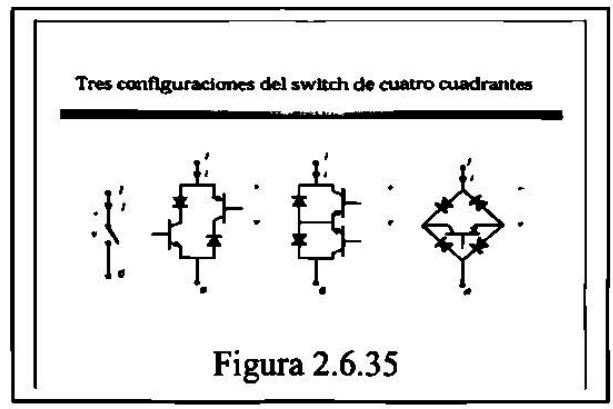


Figura 2.6.35

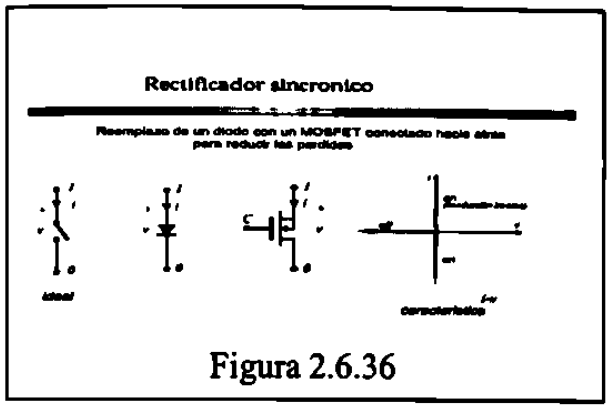


Figura 2.6.36

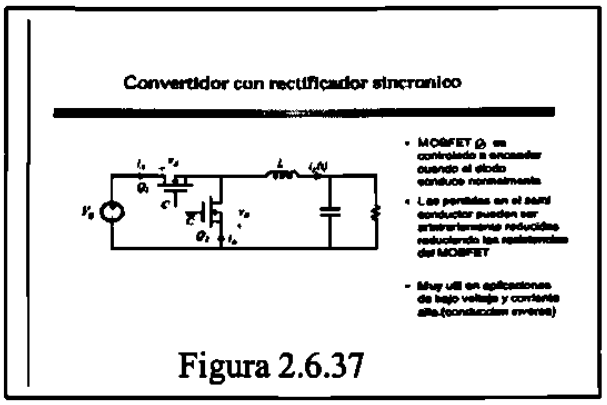


Figura 2.6.37

3. APLICACIONES INDUSTRIALES

3.1 Interruptores estáticos

La función de interrupción, puede ser en CA o en CD. Estas interruptores pueden ser aplicadas en situaciones que tengan un medio ambiente adverso, como en el caso de plantas en las que hay gran cantidad de polvos que ocasionan fallas y daños en los interruptores. A continuación se presentan circuitos simplificados que nos muestran la operación de estos dispositivos.

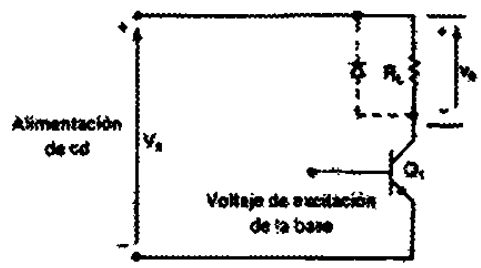


Figura 3.1.1 Interruptor CD

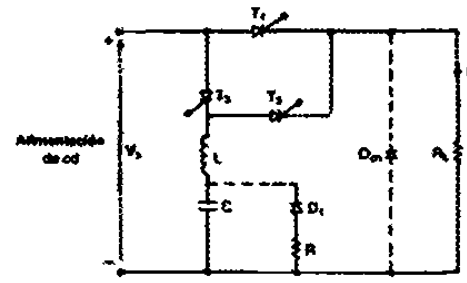


Figura 3.1.2 Interruptor con carga

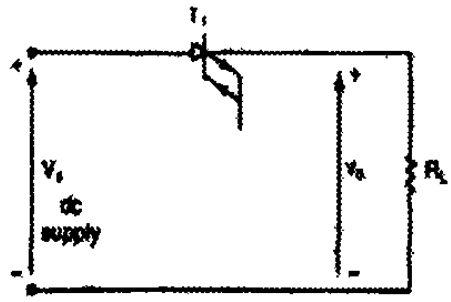


Figura 3.1.3 Interruptor con GTO

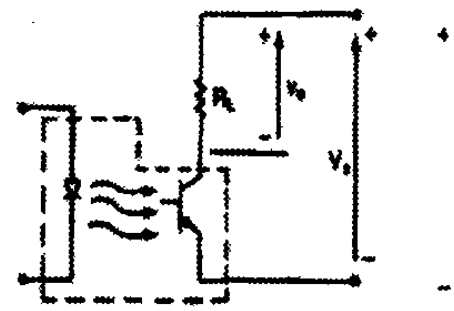
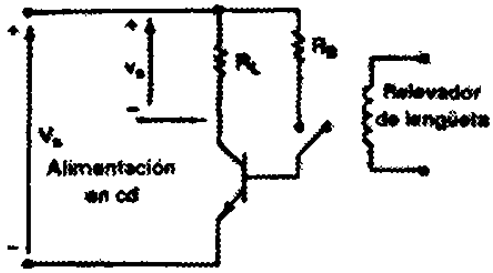
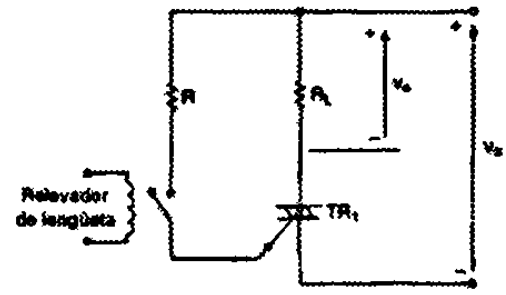


Figura 3.1.4 Interruptor opto aislado



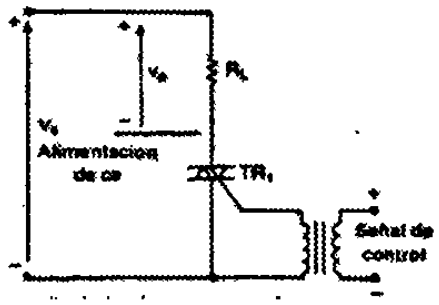
Aislamiento con relevador de lengüeta

Figura 3.1.5



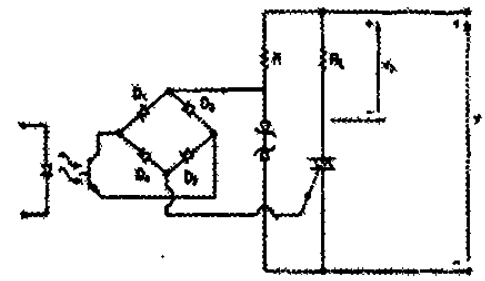
Aislamiento con relevador de compuerta

Figura 3.1.6



Aislamiento por transformador

Figura 3.1.7



Aislamiento por acoplamiento óptico

Figura 3.1.8

3.2 Propulsores de corriente directa

Los propulsores de control de motores de CD, básicamente hablamos de motores típico serie o paralelo que por sus características intrínsecas son fáciles de controlar. Estos tienen alimentación que puede provenir de un rectificador controlado o de un pulsador. Estos a su vez pueden operarse como: motor, freno regenerativo, freno dinámico, frenado invirtiendo rotación y de cuatro cuadrantes.

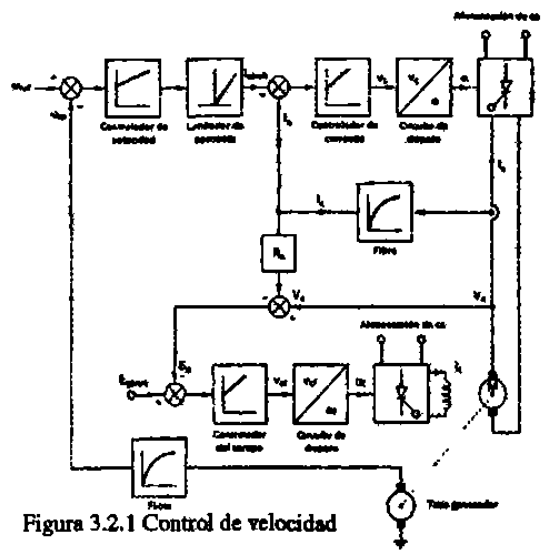


Figura 3.2.1 Control de velocidad

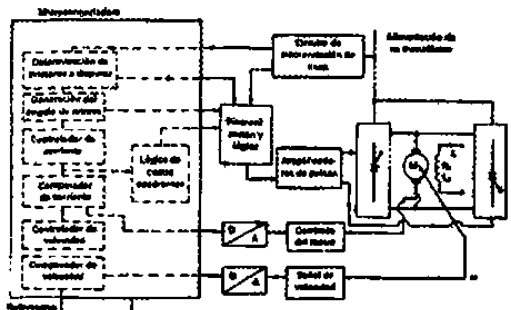


Figura 3.2.2 Control de velocidad 4 cuadrantes

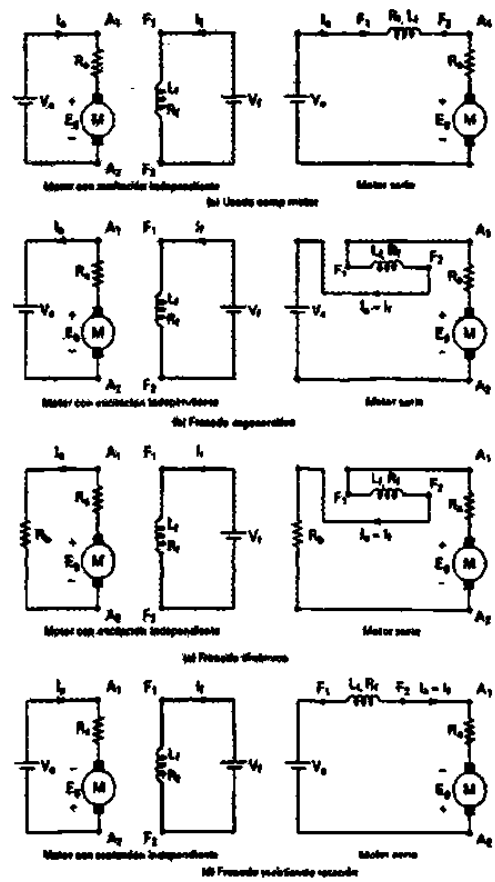


Figura 3.2.3 Tipo de conexión motor de CD

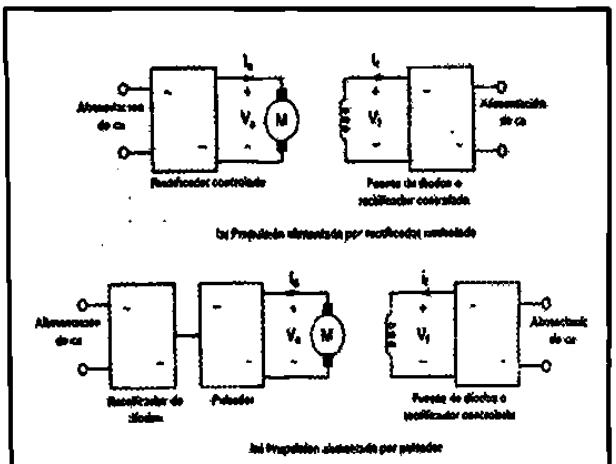


Figura 3.2.4 Control por diodos o SCR

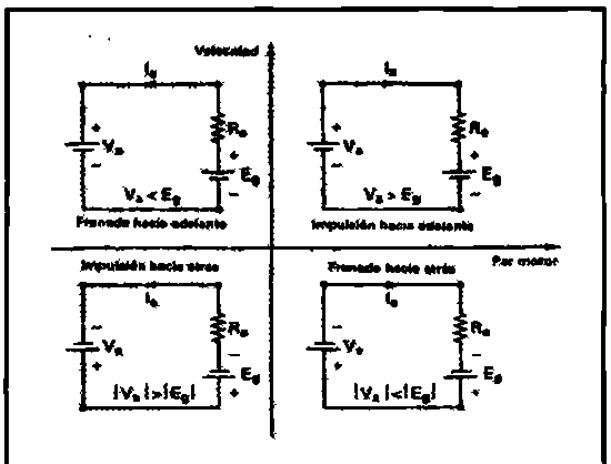
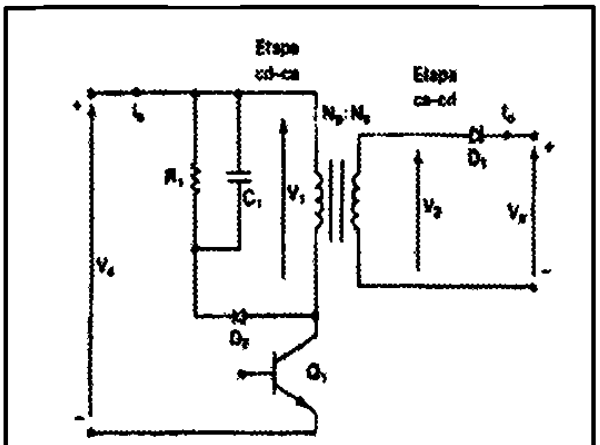


Figura 3.2.5 Grafica de operación

3.3 Fuentes de poder

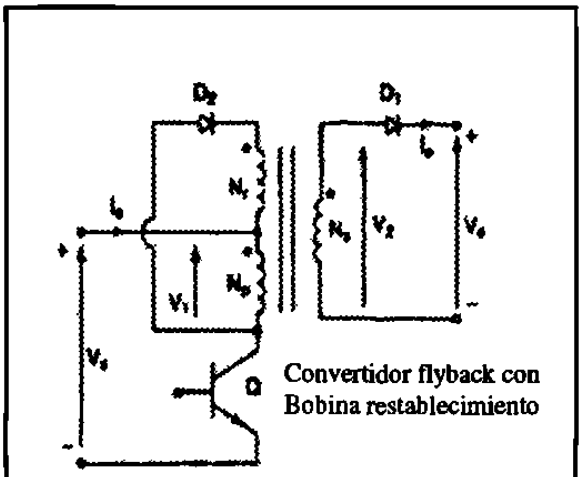
Estos pueden ser de CA o de CD, básicamente son los convertidores que ya se vieron, si clasificamos las fuentes de CD, tenemos: conmutadas, resonantes, y bidireccionales, y los de CA interrumpidas, resonantes y bidireccionales

A continuación presentamos los circuitos condensados de los diferentes tipos de fuentes.



Convertidor Flyback

Figura 3.3.1



Convertidor flyback con Bobina restablecimiento

Figura 3.3.2

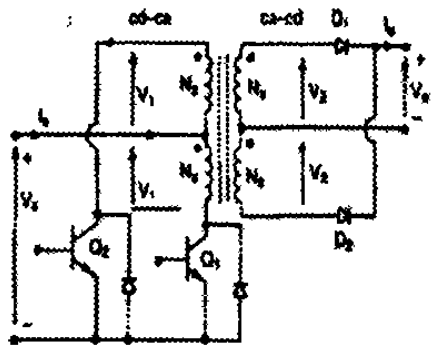


Figura 3.3.3 Convertidor Push pull

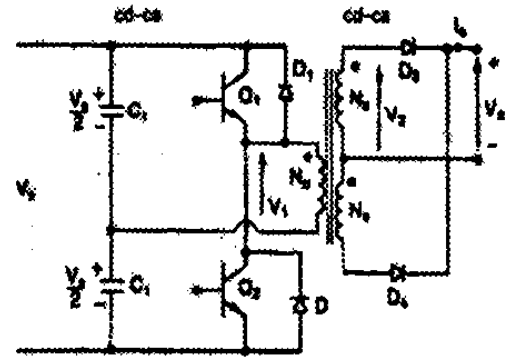
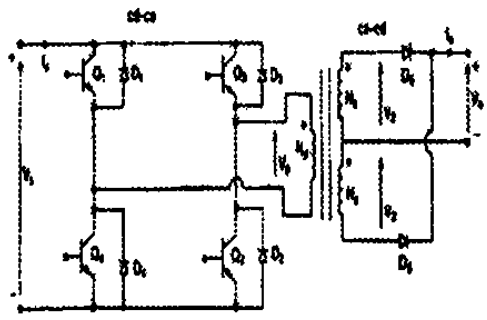
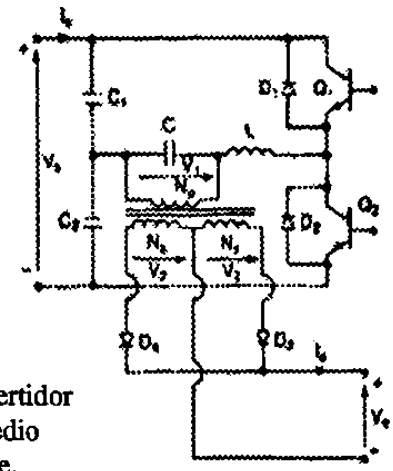


Figura 3.3.4 Convertidor de medio puente



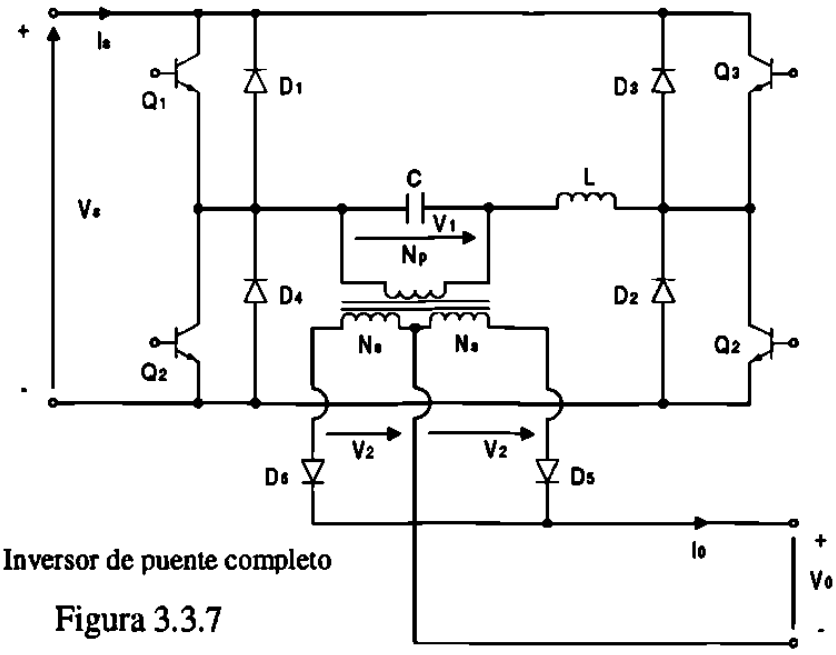
Convertidor de puente completo

Figura 3.3.5



Convertidor de medio puente.

Figura 3.3.6



Inversor de puente completo

Figura 3.3.7

3.4 Propulsores de corriente alterna

Los motores de CA requieren de un control mas complicado que los de CD, por lo que en décadas pasadas eran poco atractivo adquirir un controlador de velocidad de un motor de corriente alterna, ya que por una parte el costo muy alto y por otro lado la gran cantidad de interferencia que ocasionaba. A continuación se presenta el modelo de los motores de inducción. Los motores pueden ser controlados por las siguientes formas: controlador de voltaje del estator, control de voltaje del rotor, control de frecuencia, control de voltaje y frecuencia, control de corriente del estator y control de corriente, voltaje y frecuencia.

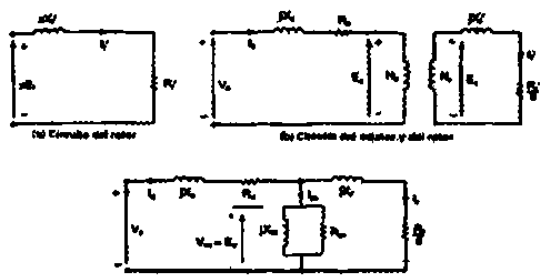


Figura 3.4.1 Circuito de motor

Figura 3.4.2 Curva

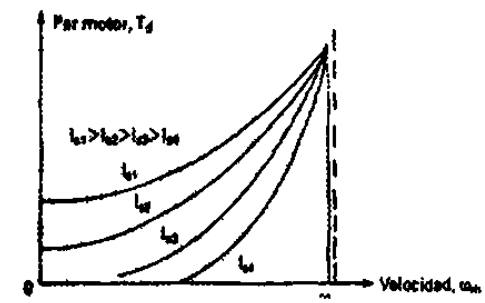


Figura 3.4.3 Controlador de motor de CA

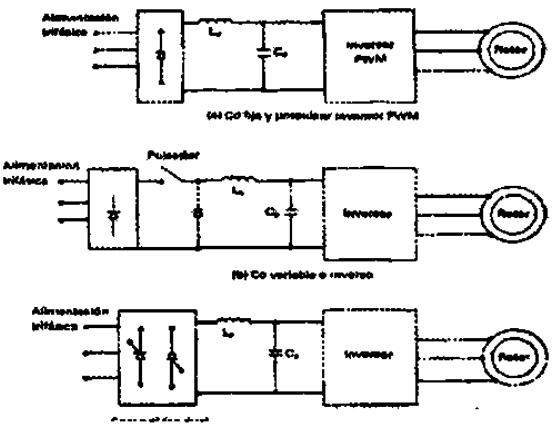


Figura 3.4.4 Curva

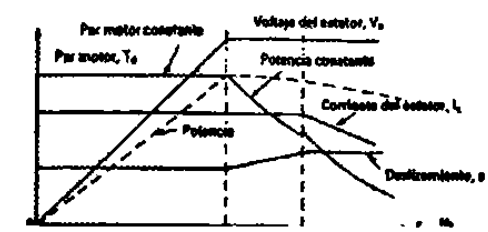


Figura 3.4.5 Curva de frecuencia

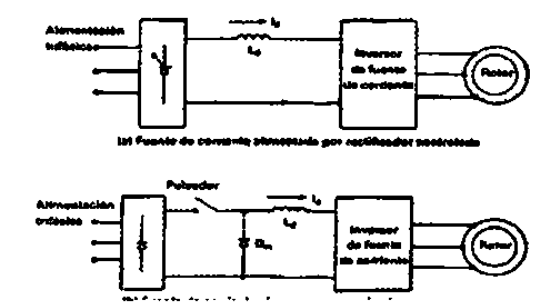


Figura 3.4.6 Controlador de motor de CA

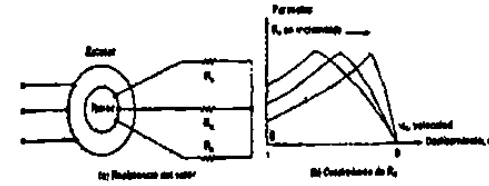


Figura 3.4.7 Curva par

4. MATERIAL DE APOYO

4.1 Preguntas y problemas resueltos.

A continuación se presentan preguntas y problemas resueltos, para disponer de una base de datos que nos permita aplicar exámenes similares y de esta forma el maestro de reciente ingreso dispone de un material de apoyo para su cátedra. A continuación se presentan un cuestionario y un problemario correspondientes al Capítulo dos cuyo titulo es MATERIAL PARA CLASES y se numeraron de acuerdo a temas en este.

2.1.1 ¿ Qué es electrónica de potencia?

Es la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica. Se basa en primer termino, en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia. Combina la energía, la electrónica y el control.

2.1.2 ¿ Cuales son los diversos tipos de tiristores ?

1 -Tiristor de conmutación forzada.
2-Tiristor conmutado por línea
3-Tiristor desactivado por compuerta. GTO
4-Tiristor de conducción inversa, RCI
5-Tiristor de inducción estático, SITH
6-Tiristor desactivado con asistencia de compuerta, GATT
7-Rectificador controlado de silicio foto activado, LASCR
8-Tiristor controlado por MOS, MCT

2.1.3 ¿ Qué es un circuito de conmutación?

Este circuito se utiliza para desactivar los tiristores conmutados en forma forzada

2.1.4 ¿ Cuales son las condiciones para que un tiristor conduzca?

Haciendo pasar una pequeña corriente a través de la terminal de la compuerta hacia el cátodo, siempre y cuando la terminal del ánodo este a un potencial mas alto que el cátodo

2.1.5 ¿ Cómo se puede desactivar un tiristor en conducción?

a) Haciendo que el potencial del ánodo sea igual o menor que el potencial del cátodo.

b) Los tiristores conmutados en línea se desactivan en razón de la naturaleza senoidal del voltaje de entrada

c) Y los tiristores conmutados en forma forzada mediante un circuito adicional conocido como circuitería de conmutación.

2.1.6 ¿ Qué es conmutación en línea?

Si el voltaje de alimentación (o de la entrada) es de CA, la corriente del tiristor pasa a través de un cero natural, y a través del tiristor aparece un voltaje inverso. El dispositivo queda entonces desactivado en forma automática debido al comportamiento natural del voltaje de alimentación.

2.1.7 ¿ Qué es conmutación forzada?

En algunos circuitos el tiristor, el voltaje de entrada es de CD, para desactivar al tiristor, la corriente en sentido directo del tiristor se obliga a pasar por cero utilizando un circuito adicional conocido como circuito de conmutación.

Por lo general, se aplica en los convertidores de CD a CD (pulsadores) y en convertidores de CD a CA (inversores). Se puede lograr de 7 maneras diferentes:

1 Auto conmutación
2 Conmutación por impulso
3 Conmutación por pulso resonante
4 Conmutación complementaria
5 Conmutación por pulso externo
6 Conmutación del lado de la carga
7 Conmutación del lado de la línea.

2.1.8 ¿ Cuál es la diferencia entre un tiristor y un TRIAC?

Que el flujo de la corriente a través de un TRIAC se puede controlar en cualquier dirección.

2.1.9 ¿ Cuál es la característica de compuerta de un GTO?

Tristor auto desactivado, se activa mediante la aplicación de un pulso breve positivo y desactiva mediante la aplicación de un pulso corto negativo, resultan muy atractivos para la conmutación forzada de convertidores.

2.1.10 ¿ Cuál es el tiempo de desactivación de un tiristor?

Es el intervalo de tiempo entre el instante en que la corriente principal se reduce a cero después de la interrupción externa del circuito de voltaje principal, y el instante que el tiristor es capaz de aceptar un voltaje principal especificado, sin activarse.

2.1.11 ¿ Qué es un convertidor?

Dispositivo que convierte la potencia de una forma a otra, se puede considerar como matriz de conmutación. Convierte el voltaje de ca en cd o viceversa.

2.1.12 ¿ Cuál es principio de conversión de CA-CD?

En este el valor promedio de voltaje de salida se puede controlar variando el tiempo conducción de los tiristores o el ángulo de retraso de disparo. Obtener un voltaje de salida de CD a partir de una fuente de corriente alterna fija.

2.1.13 ¿ Cuál es el principio de conversión de CA-CA?
Obtener un voltaje de salida CA variable a partir de una fuente de corriente fija, controlando el voltaje de salida mediante la variación del tiempo de conducción de un TRIAC o el ángulo de retraso de disparo, α.

2.1.14 ¿ Cuál es el principio de conversión de CD-CD?
Llamado también regulador o un pulsador de conmutación. El voltaje promedio de salida se controla mediante la variación del tiempo de conducción "t", del transistor Ql. Si T es el periodo de corte entonces tl=dt, d se conoce como el ciclo de trabajo del pulsador.

2.1.15 ¿ Cuál es principio de conversión de CD-CA?
Hacer el cambio de polaridad en cada medio ciclo, lo cual nos dá una corriente con forma de onda senoidal tipo cuadrada (idealmente). Se conoce también como inversor.

2.1.16 ¿ Cuáles son los pasos incluidos en el diseño de un equipo de electrónica de potencia?
Diseños de los circuitos de potencia
Protección de los dispositivos de potencia
Determinación de la estrategia de control
Diseño de los circuitos lógicos y de mando

2.1.17 ¿ Cuáles son los efectos periféricos del equipo electrónico de potencia ?
La introducción de armónicas de corriente y de voltaje en el sistema de alimentación y en la salida de los convertidores, interferencia con circuitos de comunicación y señalización.

2.1.18 ¿ Cuáles son las diferencias entre las características de compuerta de los GTO y los tiristores?
Los GTO se pueden activar mediante un pulso positivo y desactivar mediante un breve pulso negativo.

2.1.19 ¿ Cuáles son las diferencias entre las características de compuerta de tiristores y transistores?
En el transistor siempre que la unión del colector al emisor esté correctamente polarizada, éste se conservará activado. VB > VE y la Ib suficientemente grande como para excitar al transistor en la región de saturación.

2.1.20 ¿ Cuáles son las diferencias en las características de compuerta de los BJT y los MOSFET?
Los MOSFET son de alta velocidad de respuesta y son de poca potencia relativamente (1OOOV, 5OA).

2.1.21 ¿Cuál es la característica de compuerta de un IGBT?
Controlados por voltaje son adecuados para alto voltaje, altas corrientes y frecuencia de más de 20 Khz. (l2OOV, 4OOA o más capacidad).

2.1.22 ¿Cuál es la característica de compuerta de un MCT?
Se puede activar mediante un pequeño pulso de voltaje negativo sobre la compuerta MOS (respecto a su ánodo) y desactivar mediante un pulso pequeño de voltaje positivo. La ganancia de desactivación es muy alta.

2.1.23 ¿Cuál es la característica de compuerta de un SITH?
Los tiempos de desactivación y activación son muy cortos, típicamente de 0.25μs. La característica de normalmente activo y la alta caída de voltaje limitan sus aplicaciones para conversiones de energía de uso general. Dispositivo de alta potencia y alta frecuencia (audio, VHF/UHF, amp. de microondas).

2.1.24 ¿Cuáles son las diferencias entre un BJT y los IGBT?
Los IGBT son más rápidos, ofrecen características de excitación y de salidas muy superiores a los de BJT.

2.1.25 ¿Cuáles son las diferencias entre un MCT y los GTO?
El MCT se activa con un pulso negativo y se desactiva con un pulso positivo, y la ganancia de desactivación es muy alta.

2.1.26 ¿Cuáles son las diferencias entre un SITH y los GTO?
Los SITH pueden ser aplicados a convertidores de mediana potencia con una frecuencia de varios cientos de Khz. , Y más allá del rango de frecuencia de los GTO. Y los GTO son atractivos para la conmutación forzada de convertidores.

2.2.1 ¿ Cuales son los tipos de diodos de potencia?
1. diodos estándar o de recuperación
2. diodos de recuperación rápida
3. diodos schottky

2.2.2 ¿ Qué es la corriente de fuga de los diodos?
Es aquella que se presenta bajo condiciones de polarización inversa en el rango de los micros o miliamperios, cuya magnitud crece lentamente en función del voltaje inverso, hasta llegar al voltaje de avalancha o zener.

2.2.3 ¿ Qué es el tiempo de recuperación inversa de los diodos?
Es el intervalo de tiempo que los portadores minoritarios requieren para recombinarse con cargas opuestas y neutralizarse.

2.2.4 ¿ Qué es la corriente de recuperación inversa de los diodos?
Parámetro que puede ser expresado como corriente inversa de pico
di/dt.

2.2.5 ¿ Qué es el factor de suavidad de los diodos?
Es la relación que se tiene entre el tb y ta que son los tiempos de recuperación inversa que presenta el diodo.

2.2.6 ¿ Cuales son los tipos de recuperación de los diodos?

* El tiempo de recuperación de inversa trr.
* La carga de recuperación inversa qrr.
* El tiempo de recuperación directa.

2.2.7 ¿ Cuál es la causa del tiempo de recuperación inversa de un diodo de unión pn?

Debido a los portadores minoritarios que permanecen almacenados en la unión pn y en el material del cuerpo del semiconductor. Los portadores minoritarios requieren de cierto tiempo para recombinarse con cargas opuestas y neutralizarse.

2.2.8 ¿ Cual es efecto del tiempo de recuperación inversa?

Cuando un diodo esta en modo de conducción directa y su corriente se reduce a cero (debido al comportamiento natural del circuito del diodo o a la aplicación de un voltaje inverso), el diodo continua conduciendo.

2.2.9 ¿ Por que es necesario utilizar diodos de recuperación rápida para conversión de alta velocidad?

Tiene un tiempo de recuperación baja, por lo general tiene 5μseg. Y la velocidad de recuperación es a menudo de importancia critica.

2.2.10 ¿ Qué es el tiempo de recuperación directa?

El que limita la velocidad de elevación de la corriente directa y la velocidad de conmutación. Los diodos prácticos requieren de un cierto tiempo de activación, antes de que toda la superficie de la unión se haga conductora, el di/dt debe mantenerse bajo para alcanzar el limite de tiempo de activación.

2.2.11 ¿ cuales son las diferencias principales entre los diodos de unión pn y los diodos schottky?

- La carga recuperada de un diodo schottky es mucho menor que la de un diodo equivalente de unión pn.
- La corriente de un diodo schottky es mayor que la de un diodo de unión pn.
- Un diodo schottky tiene una salida de voltaje relativamente baja.
- Un diodo schottky con un voltaje de conducción relativamente bajo
- Tiene una corriente de fuga relativamente alta y viceversa.

2.2.12 ¿ Cuáles son las limitaciones de los diodos schottky?

Su voltaje máximo permisible está por lo general limitado a lOOv. Las especificaciones de corriente varían de 1 a 300 A.

2.2.13 ¿ Cuál es el tiempo de recuperación inversa típico de los diodos de uso general?
Tiene un tiempo de recuperación relativamente alto, típicamente de 25 (μseg.).

2.2.14 ¿ Cuál es el tiempo de recuperación inversa típico de los diodos de recuperación rápida?
Un tiempo relativamente bajo por lo general menor de 5 (μseg.).

2.2.15 ¿ Cuáles son los problemas de los diodos conectados en serie y cuáles son las soluciones posibles?
Problema.- en condición de bloqueo inverso, cada diodo debe de llevar la misma corriente de fuga y como resultado los voltajes de bloqueo variarán en forma significativa.
Solución: Obligar a que compartan el mismo voltaje con una resistencia a través de cada diodo. Debido a que esta distribución de voltajes iguales la corriente de fuga de cada diodo sería diferente.

2.2.16 ¿ Cuáles son los problemas de los diodos conectados en paralelo, y cuáles son las soluciones posibles?
Problema: Si se conectan resistencias de distribución de corriente pueden provocar pérdidas de energía.
Solución: Se minimiza este problema utilizando diodos con caída de voltaje directas iguales del mismo tipo.

2.2.17 Si dos diodos están conectados en serie con igual repartición de voltaje, ¿Por qué difieren las corrientes de fuga de los diodos?
Al obligar a los diodos a compartir el mismo voltaje , por esta razón la corriente de fuga de cada diodo es diferente ya que comparten esta corriente de fuga con la resistencia divisora de voltaje.

2.3.1 ¿ Cuál es la constante de tiempo de un circuito RL?

$$\tau = L / R$$

2.3.2 ¿ Cuál es la constante de tiempo de un circuito RC?

$$\tau = RC$$

2.3.3 ¿ Cuál es la frecuencia de resonancia de un circuito LC?

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

2.3.4 ¿ Cuál es el factor de amortiguamiento de un circuito RLC?

$$\varepsilon = R / 2L$$

2.3.5 ¿ Cuál es la diferencia entre frecuencia de resonancia y frecuencia de amortiguamiento de un circuito RLC?

Estas son dos propiedades de un circuito de segundo orden, la frecuencia de resonancia es la frecuencia en la cual el circuito entra en máxima amplitud y mínima impedancia. La frecuencia de amortiguamiento es aquella que nos atenúa el comportamiento de nuestra variable que analizamos, si ésta tiene el valor de uno. A continuación se presentan los casos típicos.

Si estos dos valores son iguales se tiene un sistema críticamente amortiguado,

Si $\alpha > \omega$ se tiene un sistema sobre amortiguado,

Si $\alpha > \omega$ se tiene un sistema sub-amortiguado.

2.3.6 ¿ Qué es un diodo de marcha libre y cuál es su uso?

Es un diodo que se utiliza para desviar la corriente en un circuito en el cual se tiene una inductancia y al terminar el suministro de energía a través del circuito de la inductancia genera una corriente. Para encontrar una trayectoria para la corriente de la carga inductiva.

2.3.7 ¿ Qué es la energía atrapada en el inductor?

La inductancia, al recibir corriente, ésta la va almacenando en forma de campo magnético y cuando hay un paro en el suministro este campo se transforma en corriente y se queda almacenada esta energía (corriente) al menos que esta sea disipada a través de una carga.

2.3.8 ¿ Cómo se puede recuperar la energía atrapada mediante un diodo?

Esto se puede hacer si se agrega al inductor un segundo bobinado y se conecta un diodo D1como sigue:

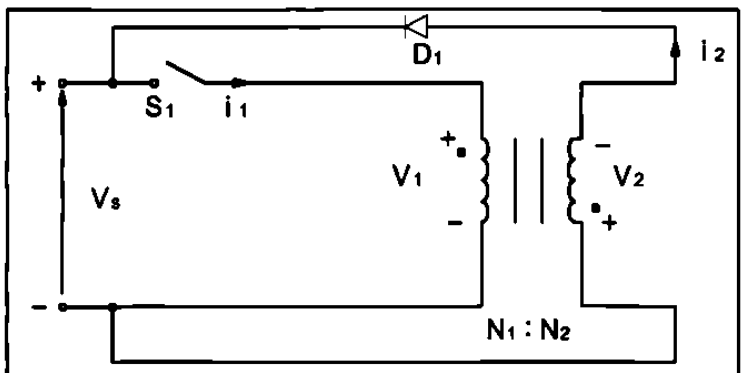


Diagrama de circuito

2.3.9 ¿ Cuál es la relación de vueltas de un transformador?

A= N2/N1

2.3.10 ¿ Qué es un rectificador? ¿Cuál es la diferencia entre un rectificador y un convertidor?

Es un circuito que convierte una señal alterna en una señal directa (rectificada), y el convertidor, su funcionamiento es que genera un voltaje de salida de CD variable a partir de un voltaje fijo de CA y el voltaje de salida se controla mediante la variación del tiempo de conducción de los tiristores o transistores.

2.3.11 ¿ Qué es la condición de bloqueo de un diodo?

Es cuando el medio ciclo negativo del voltaje de entrada al diodo, el diodo deja de conducir (se bloquea), y el voltaje de salida es cero.

2.3.12 ¿ Cuáles son los parámetros de rendimiento de un rectificador?

Eficiencia $\eta = \frac{P_{cd}}{P_{ca}}$; $FF = \frac{V_{rms}}{V_{cd}}$; $RF = \frac{V_{ca}}{V_{cd}}$; $TUF = \frac{P_{cd}}{V_s I_s}$

$$HF = \sqrt{\frac{(I_s^2 - I_{s1}^2)}{I_{s1}^2}} = \sqrt{\frac{(I_s^2 - 1)}{I_{s1}^2}} \quad ; \quad V_{ca} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{cd}^2}$$

2.3.13 ¿ Cuál es el significado del factor de forma de un rectificador?

es una medida de la forma de voltaje de salida. $FF = \frac{V_{rms}}{V_{cd}}$

2.3.14 ¿ Cuál es el significado del factor de componente ondulatoria de un rectificador?

es una medida del contenido de la componente ondulatoria. $RF = \frac{V_{ca}}{V_{cd}}$

2.3.15 ¿ Qué es la eficiencia de la rectificación?

es el porcentaje de la energía alterna que se aprovecha para convertirla en energía de corriente de corriente direct $= \frac{P_{cd}}{P_{ca}}$

2.3.16 ¿ Cuál es el significado del factor de utilización del transformador?

el porcentaje de la energía eficaz aportada por el transformador que se aprovecha para convertirla en potencia directa al circuito. $TUF = \frac{P_{cd}}{V_s I_s}$

2.3.17 ¿ Qué es el factor de desfase?

DF= cosϕ es el coseno del ángulo que existe entre las componentes fundamentales de la corriente y el voltaje.

2.3.18 ¿ Qué es el factor de potencia de entrada?

$$PF = \frac{V_s I_{s1}}{V_s I_s} \qquad Cos\phi = \frac{I_{s1}}{I_s} Cos\phi$$

2.3.19 ¿ Qué es el factor de armónicas?

HF, es una medida de la distorsión de una forma de onda y también se conoce como distorsión armónica total(THD) y se define como:

$$HF = \sqrt{\frac{(I_s^2 - I_{s1}^2)}{I_{s1}^2}} = \sqrt{\frac{(I_s^2 - 1)}{I_{s1}^2}}$$

2.3.20 ¿ Cuál es la diferencia entre un rectificador de media onda y uno de onda completa?

La diferencia radica en el rectificador de media onda, este sólo rectifica a directa en el semiciclo (+) de la señal de alterna de entrada y el rectificador de onda completa rectifica en el ciclo completo, es decir; En el semiciclo (-) también rectifica.

2.3.21 ¿ Cuál es el voltaje de salida de cd en un rectificador monofásico de media onda?

$Vcd = 0.318\ Vm = \frac{Vm}{\pi}$

2.3.22 ¿ Cuál es el voltaje de salida en cd de un rectificador monofásico de onda completa?

$Vcd = 2Vm/\pi = 0.6366\ Vm$

2.3.23 ¿ Qué es la frecuencia fundamental del voltaje de salida de un rectificador monofásico de onda completa?

La salida de un rectificador de onda completa contiene sólo armónicas pares. La segunda armónica es la más dominante y su frecuencia es 2f = 120 Hz.

2.3.24 ¿ Cuáles son las ventajas de un rectificador trifásico sobre un monofásico?

Que el rectificador trifásico se utiliza para aplicaciones de potencia mayores a 15 KW y el rectificador monofásico a potencias menores de 15 KW.

2.3.25 ¿ Cuáles son las desventajas de un rectificador trifásico sobre un rectificador Multifase de media onda?

Que tienen una mayor frecuencia fundamental de armónicas, 10 veces la frecuencia de la fuente.

2.3.26 ¿ Cuáles son las ventajas de un puente rectificador sobre un rectificador en estrella de seis fases?
Que el puente rectificador trifásico tiene mayor ganancia de voltaje de CD, que el estrella de seis fases. La potencia de salida de CD será:
$Pcd = I^2cd\ R$; $Pcd = Em^2/ R\ (m/\pi\ sen\pi/m)^2$

2.3.27 ¿ Cuáles son los objetivos de los filtros en los circuitos de rectificación?
Para reducir el nivel de armónicas en la carga, el tamaño del filtro se reduce con el aumento de la frecuencia de las armónicas. (Suavizar la salida del voltaje en cd o del rectificador)

2.3.28 ¿ Cuáles son las diferencias entre los filtros de ca y cd?
Los filtros de cd normalmente son de L, C, LC, se utilizan para suavizar la salida de voltaje en cd del rectificador. Debido a la acción de rectificación la corriente de entrada del rectificador también contiene armónicas, para eliminar algunas de las armónicas del sistema de alimentación de energía, se utiliza un filtro de ca. (LC)

2.3.29 ¿ Cuáles son los efectos de las inductancias de la fuente sobre el voltaje de salida de un rectificador?
Hace que la transferencia de corriente de la alimentación hacia los diodos no sea instantánea.

2.3.30 ¿ Cuáles son los efectos de las inductancias de la fuente sobre el voltaje de salida de un rectificador?
Una inductancia en la carga ofrece una alta impedancia para las corrientes armónicas y actúa como un filtro para reducirlas. Sin embargo esta inductancia introduce un retraso de la corriente de carga con respecto al voltaje de entrada; en el caso de un rectificador de media onda monofásico, se requiere de un diodo de marcha libre para permitir una trayectoria para esta corriente inductiva.

2.3.31 ¿ Qué es la conmutación de diodos?
Cuando un diodo en serie con una red RL es auxiliado con otro diodo en paralelo en la red RL(diodo de marcha libre) el efecto de este diodo es prevenir que un voltaje negativo aparezca a través de la carga y como resultado de la energía magnética almacenada se incrementa. En $t=\pi/\omega$ (mitad del ciclo), la corriente del diodo es transferida al diodo de marcha libre y este proceso es llamado conmutación de diodos.

2.3.32 ¿ Qué es el ángulo de conmutación de un rectificador?
En un rectificador de tres fases hay un cierto período en el cual los voltajes de ánodo de los dos diodos son iguales, y ambos diodos conducen, éste período es llamado ángulo de conmutación.

2.4.1 ¿ Qué es la característica V-I de los tiristores?
Es la gráfica de corriente del tiristor contra voltaje entre terminales del tiristor

2.4.2 ¿ Qué es la condición inactiva de los tiristores?
Es cuando el ánodo del tiristor es positivo con respecto al cátodo, 2 de las 3 uniones internas del tiristor están directamente polarizadas, mientras que la unión central se encuentra polarizada inversamente y solo deja pasar una pequeña corriente de fuga.

2.4.3 ¿ Qué es la condición activa de los tiristores?
Cuando en la condición de apagado, el voltaje ánodo-cátodo VAK se incremento a un valor suficientemente grande, la unión inversamente polarizada se rompe y el tiristor comienza a conducir.

2.4.4 ¿ Qué es la corriente de enganche entre tiristores?
Es la mínima corriente del ánodo requerida para mantenerlo encendido, inmediatamente después que ha sido encendido y la señal de compuerta ha sido removida.

2.4.5 ¿ Qué es la corriente de mantenimiento de los tiristores?
Es la corriente directa del ánodo por debajo de la cual el tiristor se bloqueará.

2.4.6 ¿ Cuál es el modelo del tiristor con dos transistores?
La acción regenerativa o de enganche debido a la retroalimentación directa se puede demostrar mediante un modelo de tiristor de dos transistores.

2.4.7 ¿ Cuáles son los procedimientos para activar los tiristores?
Por temperatura, por luz, por alto voltaje, dv/dt y corriente de compuerta.

2.4.8 ¿ Cuál es el tiempo de activación de los tiristores?
Es el tiempo entre la aplicación de señal de compuerta y la conducción plena del tiristor. Se define como el intervalo de tiempo entre el 10% de la corriente de edo. estacionario de la compuerta y el 90% de la corriente del tiristor en edo. encendido y estacionario.

2.4.9 ¿ Cuál es el objetivo de la protección di/dt ?
Evitar que un dispositivo falle como resultado de la excesiva temperatura de un punto caliente (HOT-SPOT) causado por la velocidad de flujo de corriente muy rápida, comparada con la velocidad del proceso de encendido del tiristor.

2.4.10 ¿ Cuál es el método común de protección di/dt ?
Es la adición de una inductancia en serie con el elemento.

2.4.11 ¿ Cuál es el objetivo de la protección dv/dt ?
Es para que no se active por un transitorio de voltaje, o un voltaje que sea demasiado rápido.

2.4.12 ¿ Cual es el método común de protección de dv/dt ?
Con un circuito RC conectado en paralelo conocido como circuito de freno