



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**Diseño de un Sistema de Alimentación
Ininterrumpida de 2000 VA**

Autor:

Montalbán Sánchez, Jaime

Tutor(es):

Martín Miranda, Alfredo

**Departamento de Tecnología
Electrónica**

Valladolid, junio de 2021.





ÍNDICE

1.-RESUMEN	9
2.-PALABRAS CLAVE.....	9
3.-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
4.-DESARROLLO DEL TFG: MEMORIA DESCRIPTIVA.....	13
4.1.-Variaciones en el suministro eléctrico	13
4.1.1.- Variaciones de frecuencia.....	13
4.1.2.- Fluctuaciones de tensión	13
4.1.3.- Interrupciones.....	14
4.1.4.- Bajada de tensión/subtensión	14
4.1.5.- Aumento de tensión/sobretensión.....	16
4.1.6.- Transitorios.....	17
4.1.7.- Distorsión de la forma de onda	19
4.2.-Sistemas de Alimentación Ininterrumpida.....	23
4.2.1.-Tipos de SAI.....	23
4.2.2.-Elementos principales de un SAI	26
4.2.3.-Autonomía de un SAI	35
4.3.-Topología escogida del SAI.....	36
4.4.-Potencia de la carga conectada al SAI.....	37
4.5.-Interruptores de potencia.....	38
4.5.1.- Rectificador controlado de Silicio SCR.....	38
4.5.2.- Tiristor desactivado por compuerta GTO.....	41
4.5.3.- Transistores bipolares BJT	43
4.5.4.- Transistores de efecto de campo MOSFET	44
4.5.5.- Transistores bipolares de puerta aislada IGBT.....	46
4.6.-Filtrado de armónicos.....	48
4.7.-Diseño del SAI	49
4.7.1.- Sistema Rectificador. Tipos. Dimensionado y Simulaciones.....	49
4.7.2.- Sistema Inversor. Tipos. Dimensionado y Simulaciones.	63
4.7.3.- Método de control de ancho de pulso PWM.....	76
4.7.4.- Baterías	81
4.7.5.- Bypass	81



4.7.6.- Filtro de salida.....	82
5.-CONCLUSIONES	87
6.-BIBLIOGRAFÍA.....	89
7.-ANEXOS.....	93



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variaciones de frecuencia	13
Figura 2 Fluctuación de tensión.....	14
Figura 3 Interrupciones	14
Figura 4 Bajada de tensión	15
Figura 5 Subtensión.....	15
Figura 6 Aumento de tensión	16
Figura 7 Sobretensión	16
Figura 8 Transitorio impulsivo.....	17
Figura 9 Transitorio oscilatorio.....	18
Figura 10 Desplazamiento de CC	19
Figura 11 Armónicos.....	20
Figura 12 Interarmónicos	21
Figura 13 Cortes intermitentes	22
Figura 14 Ruido.....	23
Figura 15 SAI OFF-LINE.....	24
Figura 16 SAI INTERACTIVO	25
Figura 17 SAI ON-LINE	26
Figura 18 ESQUEMA PRINCIPAL DE UN SAI	26
Figura 19 RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA POSITIVO	28
Figura 20 RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO EN ESTRELLA.....	29
Figura 21 BYPASS LTM9BPS DE SCHNEIDER.....	29
Figura 22 INVERSOR DE ONDA CUADRADA	30
Figura 23 INVERSOR DE ONDA SINUSOIDAL MODIFICADA.....	30
Figura 24 INVERSOR DE ONDA SINUSOIDAL PURA	31
Figura 25 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA.....	32
Figura 26 COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE BATERÍAS	32
Figura 27 GRÁFICA V/Ah DE UNA BATERÍA	34
Figura 28 SÍMBOLO Y FORMA DEL SCR	39
Figura 29 CIRCUITO DE UN SCR.....	40
Figura 30 CARACTERÍSTICA ESTÁTICA Y SÍMBOLO DE UN GTO	41
Figura 31 SECCIÓN DE UN GTO	42
Figura 32 SECCIÓN Y SÍMBOLO DE UN BJT.....	43
Figura 33 CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA DE UN BJT	43
Figura 34 SECCIÓN DE UN MOSFET	44
Figura 35 SÍMBOLOS DE UN MOSFET	44
Figura 36 SÍMBOLOS DE UN MOSFET	45
Figura 37 COMPARACIÓN ENTRE BJT Y MOSFET	46
Figura 38 REPRESENTACIÓN IGBT	47
Figura 39 SECCIÓN DE UN IGBT	47
Figura 40 EJEMPLO DE FILTRO EN π	48



Figura 41 EJEMPLO DE FILTRO EN T49

Figura 42 EJEMPLO DE FILTRO DE CORRIENTE (IZQDA) Y DE TENSIÓN (DCHA)
.....49

Figura 43 Onda de corriente en rect.monof. de media onda 51

Figura 44 Esquema de rect.monof. de media onda 51

Figura 45 Esquema de rect.monof. en puente 51

Figura 46 Semiciclo positivo en puente rectificador 52

Figura 47 Semiciclo negativo en puente rectificador 52

Figura 48 Tensión de rectificación onda completa en puente 52

Figura 49 Topología rectificador trifásico de media onda 54

Figura 50 Tensión rectificador trifásico de media onda 54

Figura 51 Tensión rectificador trifásico de media onda 55

Figura 52 Topología rectificador trifásico de onda completa 55

Figura 53 Conexión trifásico en estrella 56

Figura 54 Tensión rectificador trifásico de onda completa 56

Figura 55 Señal rectificada 57

Figura 56 Datasheet diodos 60

Figura 57 Catálogo radiador 60

Figura 58 Sistema rectificador 61

Figura 59 Parámetros de los diodos rectificadores y fuente de alimentación
alterna 62

Figura 60 Tensión de entrada 62

Figura 61 Tensión de salida 63

Figura 62 Símbolo TRIAC 64

Figura 63 Inversor monofásico en semipunto esquema y formas de onda .. 65

Figura 64 Inversor monofásico en puente esquema 66

Figura 65 Inversor monofásico en puente formas de onda 66

Figura 66 Inversor monofásico en push-pull esquema 67

Figura 67 Inversor trifásico en puente esquema 68

Figura 68 Inversor trifásico en puente formas de onda con control PWM 69

Figura 69 Datasheet radiadores 71

Figura 70 Datasheet radiadores 72

Figura 71 Esquema Inversor en puente monofásico 74

Figura 72 Función Matlab que regula los IGBT`s del inversor 75

Figura 73 Comparación tensiones de entrada y salida en el inversor 76

Figura 74 Señales PWM 77

Figura 75 Bloque PWM con referencias 78

Figura 76 esquema de simulación completo de inversor con PWM 79

Figura 77 Tensión de la carga y Corriente de filtro del inversor con PWM 79

Figura 78 Tensión de PWM 80

Figura 79 Tensión de la carga y Corriente de filtro del inversor con PWM 80

Figura 80 Tensión de PWM 81

Figura 81 Esquema filtro paso bajo 83



Figura 82 Gráfica filtro paso bajo	84
Figura 83 Esquema filtro pasa altas.....	84
Figura 84 Gráfica filtro paso alto	85
Figura 85 Esquema filtro paso banda	86
Figura 86 Gráfica filtro paso banda	86





1.-RESUMEN

En este proyecto se ha hecho el diseño completo de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida on-line, así como su explicación profunda tanto de topologías como de funcionamiento y simulación de cada uno de los componentes que lo forman y los motivos de todas las elecciones que se vayan tomando a la hora de desarrollar el proyecto.

ABSTRACT

In this project, the complete design of an Uninterruptible Power Supply on-line has been made, as well as its in-depth explanation of both topologies and operation and simulation of each of the components that make up and the reasons for all the choices that are made to the time to develop the project.

2.-PALABRAS CLAVE

- Variación de suministro
- SAI
- Protección
- Parámetros
- Simulación

KEYWORDS

- Supply variation
- UPS
- Protection
- Parameters
- Simulation





3.-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN:

Actualmente, la información es uno de los activos más preciados por lo que los equipos y dispositivos usados para gestionar y controlar dicha información deben ser protegidos de la mejor manera posible a fallas, tales como cortes de energía, sobretensiones, ruidos eléctricos y distorsión armónica entre otras, así como debe asegurarse su funcionamiento continuo, de lo contrario, las consecuencias podrían ser muy graves acarreando pérdidas de información relevante y caídas de sistemas que entorpecerían la vida normal de los ciudadanos.

Algunos de estos sistemas pueden ser equipos médicos, de seguridad o sistemas de bases de datos entre otros.

La red debe abastecer las necesidades energéticas básicas de un país, así como el abastecimiento crítico a comunidades industriales, financieras, gubernamentales, comerciales, médicas y de comunicación.

Las compañías eléctricas no garantizan que el suministro eléctrico esté activo las 24 horas del día durante todos los días o que la calidad energética sea perfecta en cada instante, hacen todo lo posible, pero pueden tener cualquier problema y se debe estar preparado para ello evitando pérdidas de trabajo y de producción lo que conlleva pérdidas económicas.

Ante estas situaciones hay varias soluciones como la implementación de un SAI en nuestras instalaciones.

Los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI) protegen tanto de los cortes de luz como de los posibles picos o altibajos de la tensión. Ante estas situaciones proporcionan un tiempo, según la potencia del SAI, para realizar los trabajos oportunos con un tiempo limitado, es decir, su autonomía dependerá de diversos parámetros, tales como la potencia consumida por los equipos protegidos y la disponible en el SAI.

OBJETIVOS:

En este trabajo se pretende diseñar completamente un Sistema De Alimentación Ininterrumpida de 2000VA para proteger sistemas críticos y dotarlos de un suministro de gran calidad.



Para ello, se hará una búsqueda del tipo de SAI más conveniente y que se adapte a nuestras características de 2000VA. Se escogerá de entre distintas topologías, la más adecuadas para cada uno de los elementos que formarán el SAI, así como su dimensionado.

Primero analizaremos las distintas fallas y perturbaciones que puede llevar el suministro eléctrico, después, estudiaremos los tipos de SAIs y escogeremos el más adecuado, así como sus elementos.

Por último, se diseñará y simulará el funcionamiento de esos elementos.

Para las simulaciones, se usará Simulink que es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab permitiendo simular el funcionamiento de todos los elementos de nuestro SAI conectados entre sí y dotarlos de sus parámetros característicos, así como la visualización de cada gráfica tensiones y corrientes de entrada y salida para una mejor visualización de lo que sucedería al implementar este sistema. [1]

4.-DESARROLLO DEL TFG: MEMORIA DESCRIPTIVA

4.1.-Variaciones en el suministro eléctrico

Las principales perturbaciones que afectan a la calidad y continuidad del suministro eléctrico están definidas en el estándar IEEE, algunos de estos parámetros importantes que determinan la calidad de onda de tensión son la amplitud, la frecuencia, la forma y la simetría entre otros.

Analizamos los tipos de perturbaciones de la red eléctrica:

4.1.1.- Variaciones de frecuencia

La variación de frecuencia es la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de su valor nominal especificado. Puede provocarse, entre otras causas, cuando se cargan o descargan generadores en centrales de cogeneración.

Pueden causar malfuncionamientos, caídas del sistema informático y daños en los equipos electrónicos, además de pérdida de datos en quipos informáticos.

Para corregir este problema, se debe evaluar y luego reparar, corregir o reemplazar todos los generadores de alimentación y otras fuentes de alimentación que provoquen la variación de frecuencia. [2]

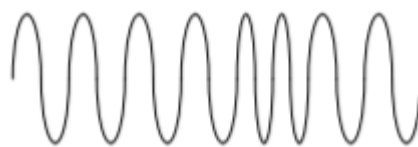


Figura 1 Variaciones de frecuencia

4.1.2.- Fluctuaciones de tensión

Una fluctuación de tensión es una variación sistemática de la forma de onda de tensión o una serie de cambios aleatorios de tensión, de pequeñas dimensiones, concretamente entre 95 y 105 % del valor nominal a una frecuencia baja, en general por debajo de 25Hz.

Cualquier carga que exhiba variaciones significativas de corriente puede causar fluctuaciones de tensión. Los hornos de arco son la causa más común de fluctuación de tensión en el sistema de transmisión y distribución.

Los métodos para resolver este problema son la eliminación de la carga problemática, el traslado del equipo sensible o la instalación de acondicionadores de línea de alimentación, así como dispositivos UPS. [2]



Figura 2 Fluctuación de tensión

4.1.3.- Interrupciones

Las interrupciones se pueden definir como la pérdida total de la tensión o corriente. En función de la duración de las interrupciones se pueden clasificar en interrupciones instantáneas, con duraciones de entre 0,5 a 30 ciclos, momentáneas, duraciones de 30 ciclos duraciones de entre 2 segundos hasta los 2 minutos y sostenidas, si la duración de la interrupción sobrepasa los 2 minutos.

Suelen estar originadas por daños en la red como puede ser caídas de rayos, árboles, animales, fallos en los equipos o interruptores automáticos. La red está diseñada para poder compensar rápidamente estos fallos, pero no siempre es eficaz. [2]



Figura 3 Interrupciones

4.1.4.- Bajada de tensión/subtensión

- Bajada de tensión: Es la caída del nivel de la tensión eléctrica con una duración de entre 0,5 ciclos a 1 minuto, presentando amplitudes

menores de la esperada y tolerada por los equipos. Se acostumbra a admitir como bajadas de tensión niveles de tensión con caídas mayores a 10% con relación a la tensión nominal especificada por la concesionaria de energía eléctrica.

Normalmente la bajada de tensión es producida durante la puesta en marcha de equipos que poseen bobinados (cargas inductivas), tales como motores, compresores y bombas, pues esos equipos consumen gran cantidad de energía al ser conectados hasta alcanzar su condición de trabajo. También son causas de bajadas de tensión conductores subdimensionados (provocan calentamiento y caída de tensión) y tapas de transformadores mal ajustadas.

Como consecuencia principal, la bajada de tensión puede acarrear desde la reducción de la vida útil hasta la quema de equipos, principalmente motores, pues origina una elevación de la corriente eléctrica y el consecuente calentamiento en sus bobinados, derritiendo la camada de aislación de los cables y colocando las espiras de la bobina en cortocircuito. [2]



Figura 4 Bajada de tensión

- Subtensión: Son el resultado de problemas de larga duración que crean bajadas de tensión.

Las subtensiones pueden crear el sobrecalentamiento de motores y pueden conducir a la falla de cargas no lineales como fuentes de alimentación de computadoras.

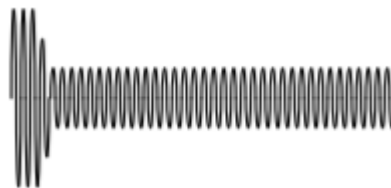


Figura 5 Subtensión

4.1.5.- Aumento de tensión/sobretensión

- Aumento de tensión: aumento en la tensión de CA con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto.

Suelen ser causas comunes las conexiones neutras de alta impedancia, las reducciones repentinas de carga y una falla monofásica sobre un sistema trifásico.

Como resultado pueden dar errores de datos, parpadeo de luces, degradación de contactos eléctricos, daño a semiconductores en equipos electrónicos y degradación del aislamiento.

Los acondicionadores de línea de suministro, los sistemas UPS y los transformadores de control ferromagnético son soluciones comunes.

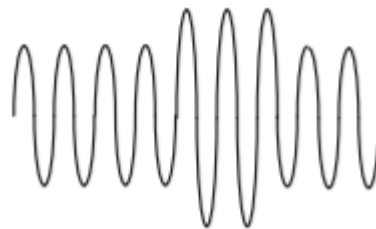


Figura 6 Aumento de tensión

- Sobretensión: aumento de tensión prolongado. Las sobretensiones también son comunes en áreas donde los valores de referencia de los taps del transformador de suministro están mal configurados y se han reducido las cargas. Esto es común en regiones estacionales donde las comunidades reducen el uso de energía fuera de temporada y aún se está suministrando la capacidad de energía para la parte de la estación de alto uso, aún cuando la necesidad de suministro es mucho más pequeña.

Las sobretensiones pueden crear un consumo de alta corriente y pueden provocar el disparo innecesario de disyuntores aguas abajo además de sobrecalentar y sobreexigir a los equipos. [2]

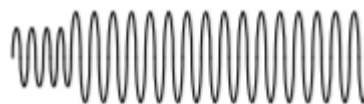


Figura 7 Sobretensión

4.1.6.- Transitorios

Los transitorios son el tipo de perturbación más perjudicial, existen dos tipos:

4.1.6.1.- Impulsivos

Son eventos repentinos de cresta y unidireccionales (positivos o negativos) en la condición de estado estable de tensión o de corriente.

Son eventos de magnitud elevada o moderada, pero de corta duración, alrededor de microsegundos. Vienen caracterizados por el tiempo de ascenso (entre 1 a 10 ns), el tiempo de descenso (entre 20 a 50 ns) y su contenido espectral.

Las causas que pueden originar este tipo de perturbaciones son rayos, descargas electrostáticas, puestas a tierras deficientes, conexión de cargas inductivas.

Los resultados que originan pueden ir desde pérdida de información, hasta el daño de los equipos conectados a red. El rayo es posiblemente la causa más perjudicial pues puede destruir equipos sensibles sin ser necesario un impacto directo de un rayo para causar daños en los equipos, pues los campos electromagnéticos creados por los rayos inducen corriente hacia las estructuras conductoras cercanas, pudiendo originar gran cantidad de daños. [2]

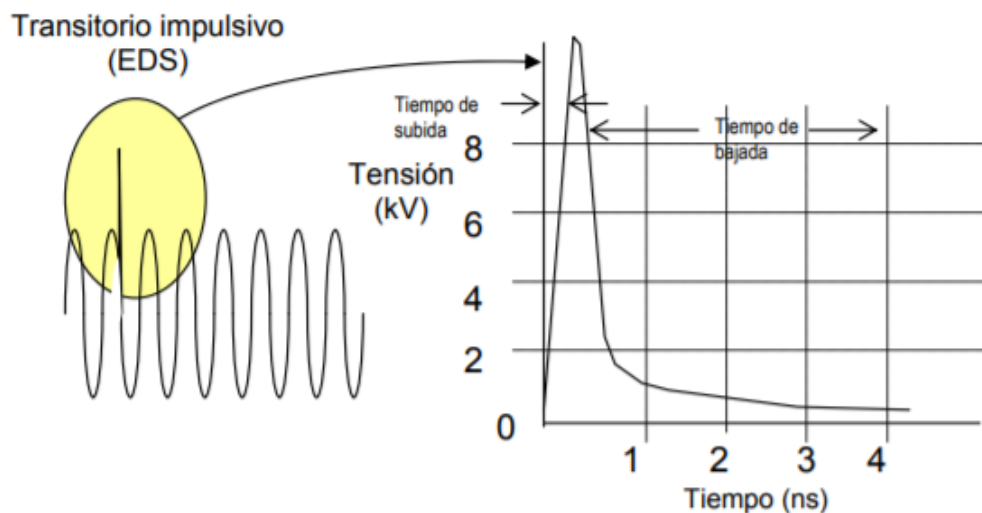


Figura 8 Transitorio impulsivo

4.1.6.2.- Oscilatorios

Es un cambio repentino en la condición de estado estable de la tensión, corriente o ambos, con polaridades positivas y negativas y de frecuencia diferente a la frecuencia de operación del sistema de potencia. Vienen caracterizados por su contenido espectral, duración y magnitud. Según su frecuencia se pueden clasificar en transitorios de alta, media y baja frecuencia.

- Los transitorios oscilatorios con una frecuencia superior de 500 kHz y una duración de microsegundos son considerados transitorios oscilatorios de alta frecuencia.
- Cuando la frecuencia de los transitorios está comprendida entre 5 y 500 kHz, se consideran transitorios de frecuencia media.
- Los transitorios con frecuencia inferior a 5 kHz y una duración de 0,3ms a 50ms son considerados transitorios de baja frecuencia.

Normalmente se producen cuando se conecta una carga inductiva o capacitiva, como un motor o un banco de condensadores. El resultado es un transitorio de este tipo pues la carga se opone al cambio. Un sistema de distribución eléctrica grande puede actuar como un oscilatorio cuando se conecta o desconecta el suministro, dado que todos los circuitos poseen alguna inductancia y capacidad inherente y distribuida.

Cuando los transitorios oscilatorios aparecen en un circuito energizado, normalmente como consecuencia de conexión de la red eléctrica, pueden ser muy perturbadores para los equipos electrónicos. [2]

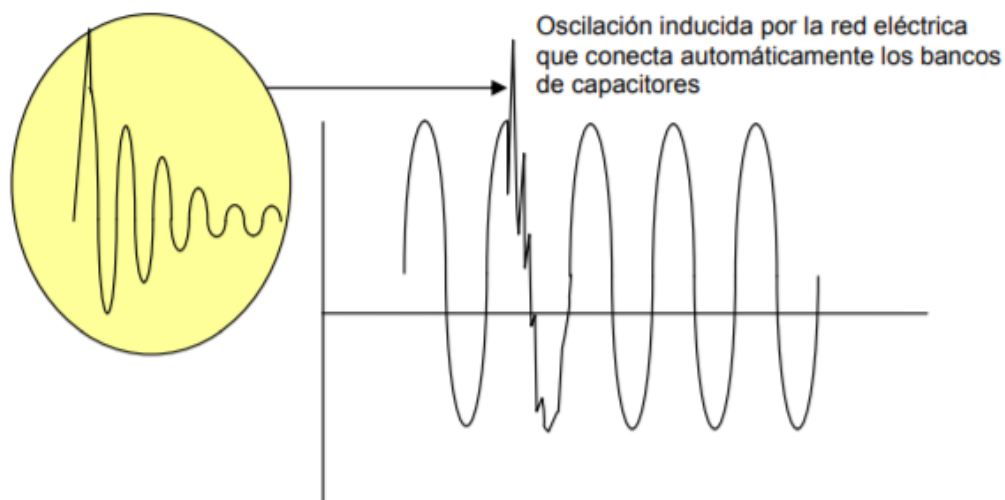


Figura 9 Transitorio oscilatorio

4.1.7.- Distorsión de la forma de onda

La distorsión de la forma de onda es una desviación estable del comportamiento idealmente sinusoidal de la tensión o la corriente a la frecuencia fundamental del sistema de potencia. Se caracteriza, principalmente, por el contenido espectral de la desviación.

Existen cinco formas primarias de distorsión de la forma de onda:

- Desplazamiento de CC
- Armónicos
- Interarmónicos
- Corte intermitente o hendidura
- Ruido

4.1.7.1.- Desplazamiento de CC

La CC puede trasponer el sistema de suministro de CA y agregar corriente indeseada a dispositivos que están funcionando a su nivel nominal. El sobrecalentamiento y saturación de los transformadores pueden ser el resultado de circulación de corrientes CC. Cuando un transformador se satura, no solamente se calienta, sino que además es incapaz de entregar su potencia a la carga, y la subsiguiente distorsión de forma de onda puede crear una mayor inestabilidad en los equipos de carga electrónica. [2]

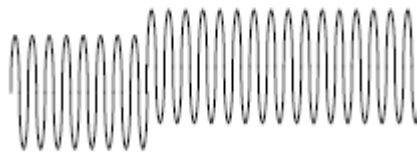


Figura 10 Desplazamiento de CC

La solución es reemplazar el equipo defectuoso, poseer equipos modulares y reemplazables por el usuario aumenta la facilidad de solucionar este tipo de problemas con menos costo del que podría ser el necesitar mano de obra especializada. [2]

4.1.7.2.- Armónicos

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo integral de la frecuencia fundamental del sistema. Las formas de onda distorsionadas son descompuestas, de acuerdo con Fourier, es la suma de una componente fundamental más las componentes armónicas. La distorsión armónica se origina, fundamentalmente, por la característica no lineal de las cargas en los sistemas de potencia.

El nivel de distorsión armónica se describe por el espectro total armónico mediante las magnitudes y el ángulo de fase de cada componente individual. Es común, además, utilizar un criterio denominado distorsión total armónica (THD) como una medida de la distorsión.



Figura 11 Armónicos

Los armónicos pueden tener diversas consecuencias como:

- Pueden causar errores adicionales en las lecturas de los medidores de electricidad.
- Causan vibraciones y ruido acústico en transformadores, reactores y máquinas rotativas.
- Son la causa de interferencias en las comunicaciones y en los circuitos de control.
- Provocan la disminución del factor de potencia.
- Están asociados con el calentamiento de condensadores.
- Provocan calentamiento adicional debido al incremento de las pérdidas en transformadores y máquinas.
- Causan sobrecargas en transformadores, máquinas y cables de los sistemas eléctricos.
- Los armónicos de tensión pueden provocar disturbios en los sistemas electrónicos. Por ejemplo, afectan el normal funcionamiento de los tiristores. [2]



En general, para solucionar estos problemas se suelen usar filtros de armónicos los cuales inducen ondas de las mismas características que los armónicos, pero en sentido contrario de manera que se anulen entre sí y sólo nos quedemos con la onda fundamental y así poder suministrar una red de máxima calidad.

4.1.7.3.- Interarmónicos

Es un tipo de distorsión de forma de onda que suele ser el resultado de una señal sobrepuesta en la señal de tensión por equipos eléctricos como convertidores de frecuencia estáticos, motores de inducción y dispositivos de generación de arco. Los cicloconvertidores, usados para controlar grandes motores lineales, crean algunos de los problemas más importantes de las fuentes de alimentación interarmónica. Estos dispositivos transforman la tensión de potencia en una tensión de CA de una frecuencia menor o mayor que la de la frecuencia de suministro.

La consecuencia mas notable de este problema es el parpadeo de monitores y luces incandescentes, además de causar un posible calentamiento e interferencia en comunicaciones.

Como soluciones pueden ser usados filtros, sistemas UPS y acondicionadores de línea. [2]

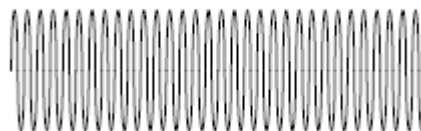


Figura 12 Interarmónicos

4.1.7.4.- Cortes intermitentes

Es una perturbación periódica de la tensión causada por dispositivos electrónicos, como controles de velocidad variable, atenuadores de luz y soldadores por arco durante el funcionamiento normal. Este problema podría describirse como un problema de impulso transitorio, pero dado que los cortes intermitentes son periódicos en cada medio ciclo, el corte intermitente se considera un problema de distorsión de la forma de onda.

Sus consecuencias pueden ser el paro total del sistema, pérdida de datos y problemas de transmisión de datos.

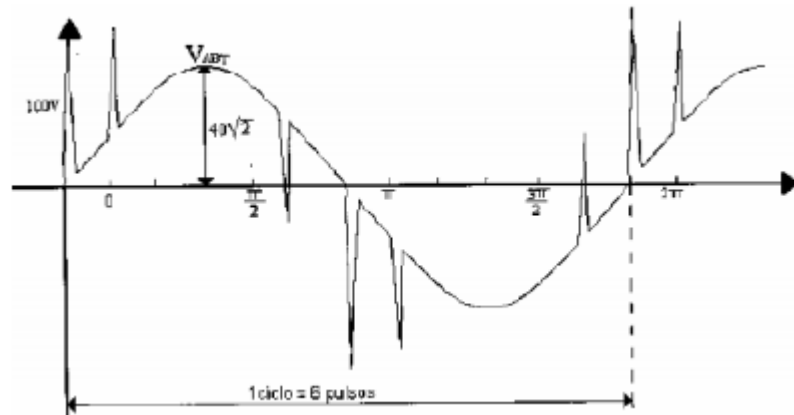


Figura 13 Cortes intermitentes

Una solución a este problema es trasladar la carga lejos del equipo causante del problema, así como el uso de UPS y equipos de filtrado. [2]

4.1.7.5.- Ruido

Es una tensión indeseada o corriente superpuesta en la tensión del sistema de energía eléctrica o forma de onda de la corriente. El ruido puede ser generado por dispositivos electrónicos alimentados eléctricamente, circuitos de control, soldadores por arco, fuentes de alimentación para conexiones, transmisores radiales etc. Los sitios con conexiones de puesta a tierra deficientes hacen que el sistema sea más susceptible al ruido. El ruido puede causar problemas técnicos a los equipos como errores de datos, malfuncionamiento de los equipos, falla de componentes a largo plazo, falla del disco duro y monitores con vídeo distorsionado. [2]

Algunas soluciones contra el ruido pueden ser:

- Uso de sistemas UPS aislando la carga.
- Instalar un transformador de aislamiento blindado y con puesta a tierra.
- Reubicar la carga lejos de la fuente de interferencia.
- Instalar filtros de ruido.
- Blindar los cables.

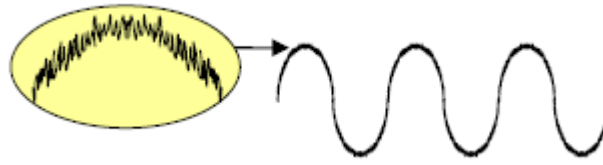


Figura 14 Ruido

4.2.-Sistemas de Alimentación Ininterrumpida

Un SAI o UPS es un dispositivo que permite mantener constante el suministro de alimentación eléctrica cuando hay un fallo por alguna anomalía en la red. Sirve, por tanto, para proteger los dispositivos que estén conectados a la red eléctrica y mantenerlos en funcionamiento evitando así pérdida de datos y daños en archivos importantes. [3]

Además, actúa como filtro pues protege a la carga conectada de sobretensiones o bajadas de tensión.

La elección de un tipo u otro de equipo vendrá determinado por una serie de factores como pueden ser:

- Tipo de equipo a proteger: Ordenadores, equipos de redes y comunicaciones, motores, sistemas de vigilancia, sistemas médicos, etc.
- Entorno de uso del Sai. En función si va a utilizarse en un entorno doméstico, empresarial, industrial, etc.
- Tipo en entrada/salida. Monofásica/Monofásica, Trifásica/Monofásica, Trifásica/Trifásica.
- Calidad de la red eléctrica de la empresa suministradora.
- Autonomía del Sai que se requiere para cubrir la necesidad.
- Presupuesto de compra del que disponemos.

4.2.1.-Tipos de SAI

Sus tipos se distinguen en función de la manera en la que almacenan la energía y cómo posteriormente la suministran a las cargas conectadas:

- VFI (On-line). La frecuencia y la tensión de salida del SAI no dependen de la de entrada.

- VFD (Off-line). La frecuencia y la tensión de salida del SAI son las mismas que la de entrada o dependientes de esta.
- VI (Interactivo). La frecuencia de salida del SAI depende de la de entrada, pero en cambio la tensión de salida es independiente de la de entrada.

4.2.1.1.-OFF-LINE

En un SAI Off-Line la corriente eléctrica está pasando sin ningún filtro a los dispositivos ya que no disponen de AVR integrado. El SAI únicamente empezará a funcionar cuando detecte un fallo de corriente, en ese momento, casi instantáneamente comenzará a suministrar la energía que ha ido almacenando en sus baterías. Estos SAI`s son solo recomendables para las zonas que disponen de una red estable ya que, al no realizar ningún filtrado de la corriente, solo protegen ante una interrupción brusca de la corriente (apagón eléctrico).

Aplicaciones: zonas con pocas perturbaciones y red eléctrica de buena calidad.
[4]

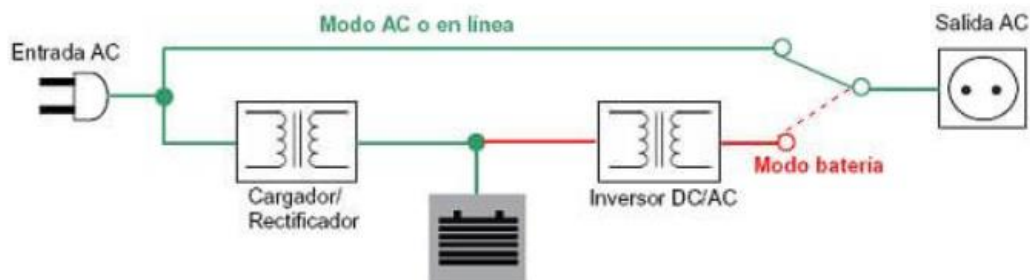


Figura 15 SAI OFF-LINE

4.2.1.2.-INTERACTIVO

Un SAI Interactivo es parecido al SAI Off-Line, pero incorpora un microprocesador que controla las fluctuaciones de la red en $\pm 15\%$, regulando la tensión de salida (efecto Buck/Boost AVR Integrado), este proceso de filtrado y mejora continua de la corriente que llega a los dispositivos conectados al SAI se realiza sin que entren a funcionar las baterías, por lo que la protección con un SAI interactivo es mayor aún sin sufrir apagones. En el momento en que se detecta un corte de corriente empiezan a funcionar casi instantáneamente las baterías para evitar que el ordenador se apague. Debido a sus características

técnicas y rango de precios, el SAI interactivo es el considerado como adecuado para equipos de gama baja y media.

Aplicaciones: Ordenadores gama media y baja, consolas de juegos, pequeños servidores de redes, equipos de oficina, etc. [4]

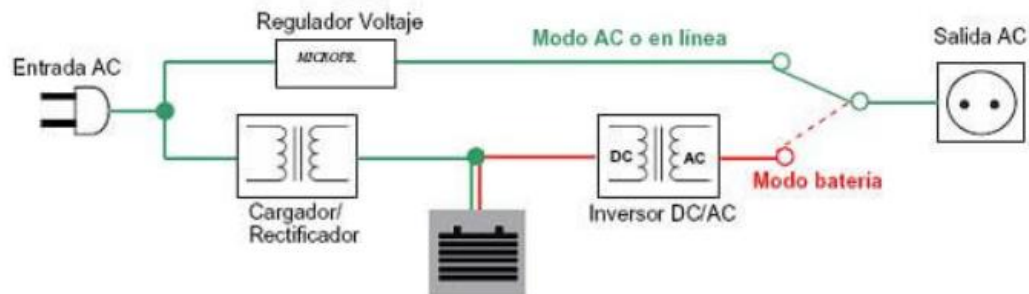


Figura 16 SAI INTERACTIVO

4.2.1.3.-ON-LINE

Por último, está el SAI On-Line, que realiza una doble conversión de la energía eléctrica que recibe, transformándola en continua y después a alterna de nuevo, eliminando de esta manera todos los problemas que pueda tener. Un Sai On-Line siempre proporciona energía eléctrica directamente desde sus baterías mientras estas se van cargando de la red, y esto es lo que garantiza que la protección contra cualquier problema de la red eléctrica sea total. Debido a su alta fiabilidad, la tecnología On-Line ocupa el sector profesional en el mercado de SAIS y está generalmente destinada a proteger servidores, equipos industriales o cualquier instalación informática que por su importancia o coste necesite la seguridad de no verse afectados por problemas derivados de la red eléctrica.

Aplicaciones: servidores, clúster de equipos, y en general instalaciones informáticas críticas o imprescindible (redes de datos, servidores, telecomunicaciones, industria, etc.). [4]

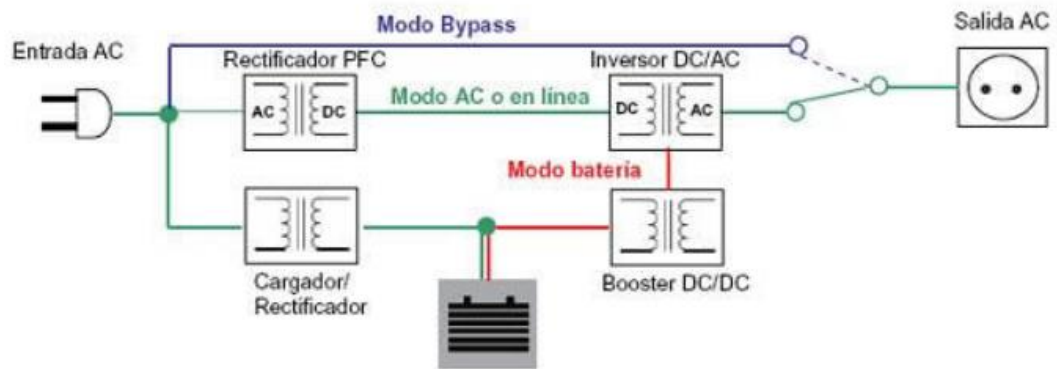


Figura 17 SAI ON-LINE

4.2.2.-Elementos principales de un SAI

A continuación, expondremos los elementos principales de un SAI con independencia de su topología.

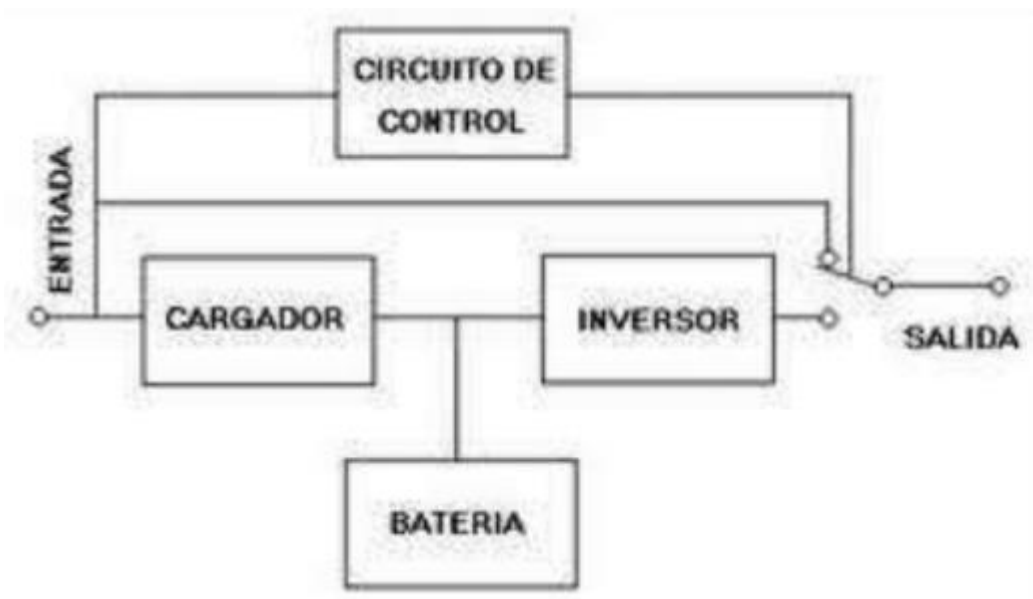


Figura 18 ESQUEMA PRINCIPAL DE UN SAI

El SAI dispondrá de una **batería** o serie de baterías las cuales almacenarán la energía que llega de la red eléctrica para poder usar dicha energía en cualquiera de los sucesos expuestos anteriormente como por ejemplo cuando la red eléctrica sufra un corte.



Como se puede intuir, antes de la batería tendrá que haber un **rectificador** que pase la tensión alterna de la red a tensión continua pues la batería trabaja en tensión continua.

Después de la batería necesitaremos un **inversor** para pasar la tensión continua de la batería a tensión alterna de salida y así alimentar la carga.

Además, necesitaremos un filtro para obtener una señal de salida de calidad, un circuito de control y una línea directa de la red por si alguno de los elementos anteriores falla con un bypass manual.

4.2.2.1.-Rectificador

Se compone principalmente por “diodos rectificadores”, el diodo rectificador es un dispositivo semiconductor de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica en una sola dirección o sentido ya que logra bloquear la corriente cuando ésta circula en sentido opuesto. Gracias a su comportamiento logra convertir la corriente alterna en corriente continua para así poder alimentar la batería del SAI.

Por una parte, nos mantendrá la batería cargada proporcionándole una tensión de flotación constante evitando su descarga y por otra, proporcionará al inversor la energía necesaria para alimentar la carga en la topología ON-LINE.

Según el tipo de rectificación se dividen en:

1.- Rectificadores de media onda:

Los rectificadores de media onda funcionan haciendo pasar la mitad de la corriente alterna a través de un diodo, convirtiendo en este paso dicha mitad de la corriente alterna en corriente eléctrica directa. Los rectificadores de media onda no son muy eficientes porque sólo convierten la mitad de la corriente alterna (bien la positiva, bien la negativa) en corriente directa. Por el contrario, los rectificadores de media onda son mucho menos complicados y solamente requieren un diodo para su funcionamiento.

Según las formas de onda permitidas, los rectificadores de media onda se pueden subdividir en:

- Rectificador de media onda positivo que bloquea el semiciclo negativo y permite semiciclos positivos a través del diodo.
- Rectificador de media onda negativo que bloquea el semiciclo positivo y permite semiciclos negativos a través del diodo. [5] Y [6]

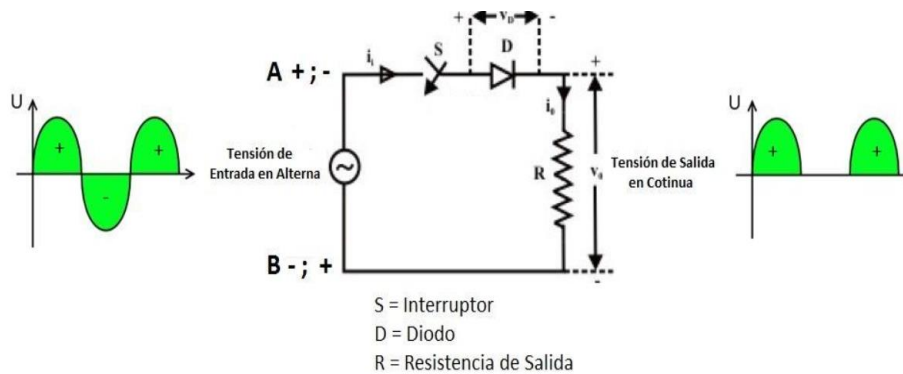


Figura 19 RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA POSITIVO

2.- Rectificadores de onda completa

Los rectificadores de onda completa son más complejos que los rectificadores de media onda, pero también son mucho más eficientes. Los rectificadores de onda completa generalmente utilizan cuatro diodos para funcionar. Hacen pasar la corriente alterna a través del sistema de cuatro diodos, reemplazando toda la corriente por una corriente directa.

Según la señal de alimentación se dividen en:

- Rectificadores monofásicos que están alimentados por una fase de la red eléctrica. El tipo más simple de rectificadores es el monofásico de media onda, que presenta un único diodo entre la fuente de alimentación alterna y la carga.
- Rectificador trifásico que cumple con la misma tarea que un rectificador monofásico, con la única diferencia que son alimentados por fuentes trifásicas. Gracias a esta característica, los rectificadores trifásicos son mucho más eficientes y logran manejar grandes potencias. Con frecuencia se utilizan en el sector industrial para producir corrientes continuas que impulsan cargas de potencia elevada. Pueden tener distintas posiciones. [5] y [7]

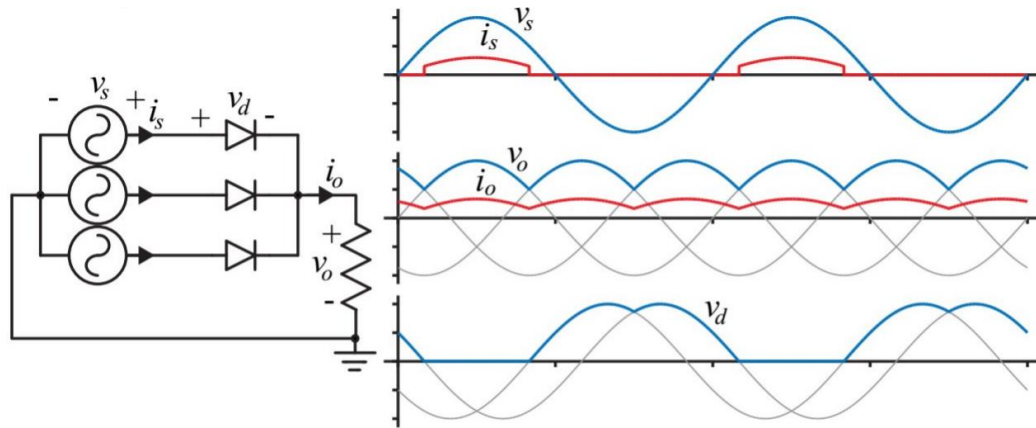


Figura 20 RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO EN ESTRELLA

4.2.2.2.- Bypass estático y manual

Sencillamente son conmutadores de dos posiciones, en una posición dejará circular la corriente para que todo funcione según lo previsto y en otra corta el paso normal de la corriente en caso de que el inversor sufra una avería o sobrecarga dejando pasar a su vez la corriente por una línea auxiliar del SAI de manera que no se interrumpa nunca la alimentación de la carga que es el objeto de este estudio, de esta manera, aumentamos la fiabilidad de nuestro sistema.

Permite realizar labores de mantenimiento del SAI sin interrumpir la alimentación de la carga, pero en este caso, la carga será alimentada de la red eléctrica directamente quedando desprotegida a fallas de esta. Dispone de una manera de trabajo sincronizada que evita que se alimente a la carga desde la red auxiliar y desde en paralelo. [8]



Figura 21 BYPASS LTM9BPS DE SCHNEIDER

4.2.2.3.-Inversor

Es un dispositivo capaz de transformar la corriente continua DC procedente de la batería o del rectificador, en una corriente alterna AC a un voltaje y frecuencia determinados para dar tensión de salida a la carga conectada.

Pueden ser de 3 tipos:

- Onda cuadrada adecuados para el suministro de cargas puramente resistivas.

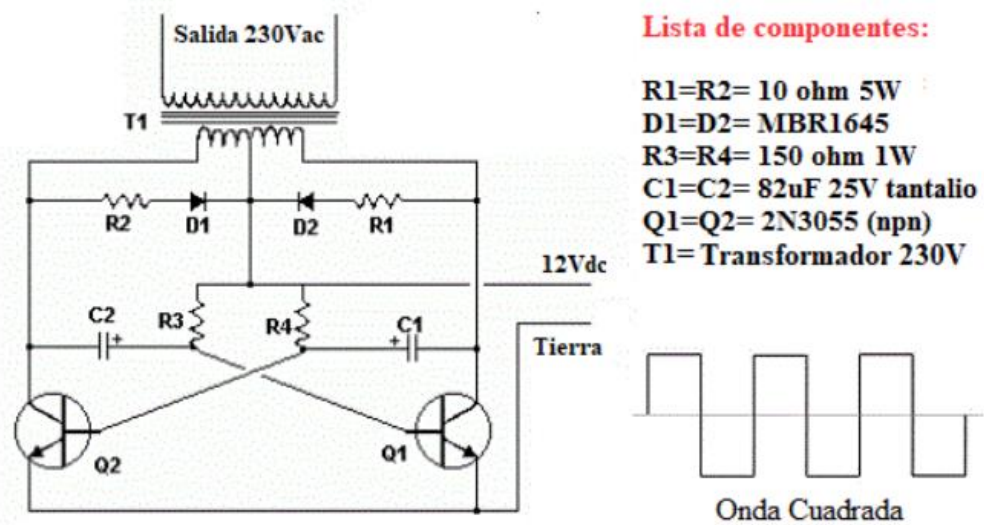


Figura 22 INVERSOR DE ONDA CUADRADA

- Onda sinusoidal modificada para cargas resistivas y capacitivas.



Figura 23 INVERSOR DE ONDA SINUSOIDAL MODIFICADA

- Onda sinusoidal pura adecuados para todo tipo de cargas pues reproducen fielmente la onda sinusoidal de nuestra red eléctrica doméstica.

Los inversores de onda senoidal pura son aquellos que son capaces de reproducir una onda uniforme entre los diferentes pulsos. La ventaja que tienen este tipo de inversor frente a los inversores de onda senoidal modificada o cuadrada es que los pulsos entre las ondas son mucho más bruscos y segmentados. Es por ello, que para la utilización de aparatos electrónicos será muy recomendable la utilización de los inversores de onda senoidal pura, ya que permitirá que el tipo de corriente con el que alimentemos el aparato será exactamente igual a la que podemos recibir de la red eléctrica convencional.

La repercusión de la utilización de inversores de onda senoidal pura es que la vida de los aparatos electrónicos será mucho más larga en comparación con los inversores de onda senoidal modificada. [9] y [10]

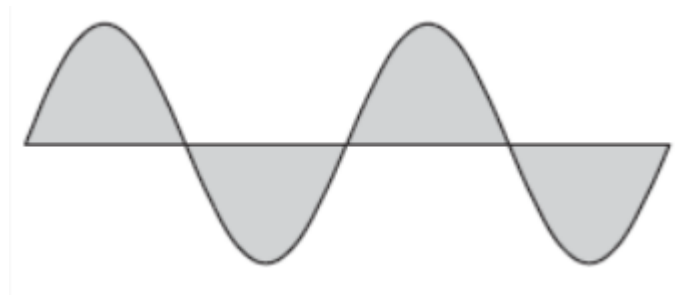


Figura 24 INVERSOR DE ONDA SINUSOIDAL PURA

4.2.2.4.-Batería

La batería es el elemento que almacena la energía con la que se alimentará la carga en caso de fallo o perturbación importante en la red eléctrica.

A pesar de que las baterías pueden estar compuestas por diferentes materiales dependiendo de cada tipo, la estructura básica es la misma. Podemos encontrar elementos que son comunes y cada uno de estos tiene cumple una función especial.

Dentro de la construcción podemos encontrar diferentes celdas, cada una contiene dos polos (ánodo y cátodo) de diferentes materiales, un electrolito conductor y una carcasa.

En cuanto a los polos puede existir una pequeña confusión y esto se debe a que en las baterías lo polos son inversos de lo que normalmente se acostumbra, el ánodo es el polo negativo y el cátodo es el polo positivo, esto se debe a ánodo es el que genera las cargas negativas o electrones.

El funcionamiento de una batería se basa en una reacción electroquímica llamada Redox (reducción – oxidación). Esta reacción a simples palabras trata de un intercambio de electrones entre dos polos, provocando un cambio en los estados de oxidación de los materiales. [11]

Las baterías tienen especial sensibilidad a la temperatura siendo 20°C la temperatura idónea para un buen rendimiento en cuanto a capacidad, vida útil y tensión de flotación. Hay que controlar dichas temperaturas y que el SAI se adapte a ellas ajustando la tensión de flotación correcta.

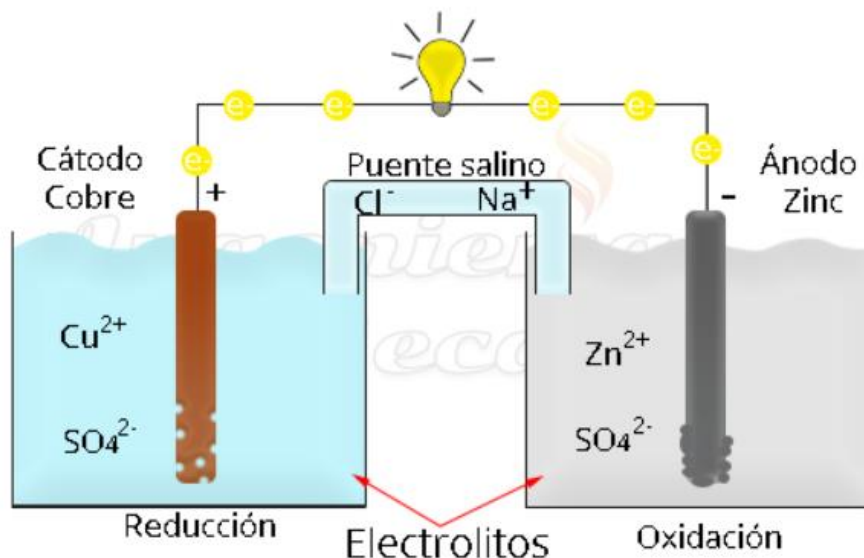


Figura 25 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA

Tipo	Energía/ peso	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
Plomo	30-40 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Fe	30-55 Wh/kg	1,2 V	+ de 10 000	4-8h	10 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14h *	30 %
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2h-4h *	20 %
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,7 V	4000	2h-4h	25 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1h-1,5h	10 %

Figura 26 COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE BATERÍAS

Las baterías son el elemento más caro, pesado y voluminoso del SAI y decidirá sus prestaciones por lo que es importante prestarle especial atención. Son



bastantes los parámetros que las definen así que en esta entrada haré un repaso de algunos de ellos para aclarar conceptos.

Los cuatro parámetros más importantes de una batería (a parte del coste, tamaño y peso) son el voltaje expresado en Voltios (V), la capacidad de carga en Amperios-Hora (Ah), la energía almacenada expresada en Vatios-Hora (Wh) y la máxima corriente que es capaz de suministrar en Amperios (A).

Para hacernos una idea rápida de cómo nos afectan estos parámetros se puede decir que Voltaje=Revoluciones, Corriente=Par y que Energía almacenada=Autonomía.

Veamos un poco más en profundidad:

- Capacidad de carga o de almacenamiento de una batería (en Ah):
La capacidad de carga se refiere al tiempo que una corriente de un determinado amperaje puede ser extraída de una batería antes de que ésta se agote. Por ejemplo, si la capacidad de una batería es de $C=40Ah$ ésta en teoría puede dar 4A durante 10 horas, 8 A durante 5 horas, 40 A durante una hora u 80A durante media hora. Esto no es del todo cierto ya que la capacidad variará en función de cómo extraigamos la carga. Cuanto más rápido lo hagamos menor será la capacidad final y al revés, cuanto más lento extraigamos la carga mayor será la capacidad final. Para entendernos, una batería de 40Ah capaz de dar 4A durante 10 horas, al suministrar 40 Amperios es probable que dure menos de una hora.
- Capacidad de descarga (en Amperios):
Por lo tanto, la capacidad de descarga nos dirá cuanta corriente es capaz de dar la batería sin degradarse o quemarse. Así que cuanto mayor sea esta capacidad mejor ya que dispondremos de más amperios y por lo tanto de más par y potencia.
- El Voltaje, tensión o diferencia de potencial (en Voltios):
es la magnitud física que impulsa a los electrones a través de un circuito eléctrico cerrado provocando el flujo de una corriente eléctrica. El voltaje en los terminales de la batería lo podemos expresar matemáticamente como $V=E-I \cdot R$ asumiendo que la corriente sale de la batería. Donde:
V es el voltaje en los terminales o bornes.
R es la resistencia interna de la batería.
E es el voltaje fijo de la batería o tensión del circuito abierto.

Esta ecuación nos dice que al aumentar la corriente que se suministra, la tensión V disminuirá $I \cdot R$ por lo tanto nos interesa que la resistencia

interna de la batería sea lo más pequeña posible. Por el contrario, cuando cargamos la batería el voltaje V aumentará $I \cdot R$.

El voltaje, viene fijado por el potencial del par redox utilizado, suele estar entre 1V a 4V por celda. Es uno de los parámetros más característicos pues nos da información de si la batería sirve para la aplicación deseada.

El valor de V que dan los fabricantes es un valor nominal. Cuando la batería está completamente cargada este valor estará por encima y a medida que se va descargando va disminuyendo hasta estar bastante por debajo del valor nominal.

Podemos ver como interactúan realmente todos estos parámetros en la siguiente gráfica que corresponde a una batería de 3V/20Ah. [12]

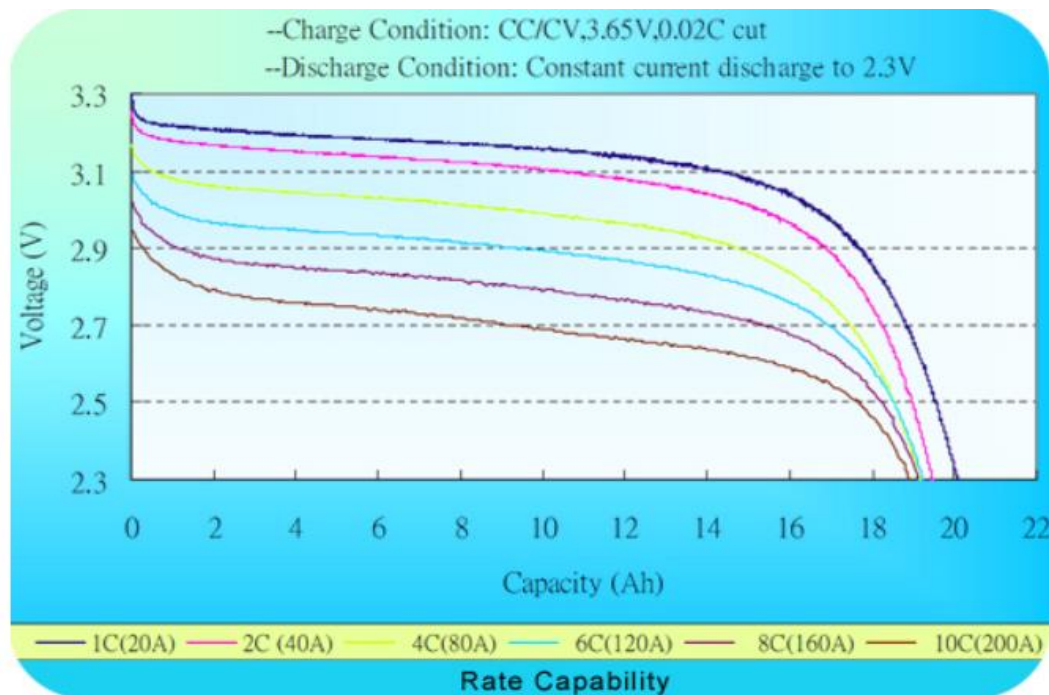


Figura 27 GRÁFICA V/Ah DE UNA BATERÍA

- Voltaje de flotación:
es el mínimo voltaje que hay que aplicar permanentemente a la batería para mantener a la batería 100% cargada cuando no está alimentando a ninguna carga. Es un parámetro importante pues depende de la tecnología de fabricación utilizada y tiene que ser el adecuado para no sobrecargar a la batería. El rango de voltaje de flotación está en torno a 2,15-2,30V por celda, por lo que el voltaje de flotación a aplicar a una batería dependerá del número de celdas por las que esté compuesta.



4.2.3.-Autonomía de un SAI

Se conoce como tiempo de servicio o de respaldo de un SAI, es el tiempo durante el cual este dispositivo electrónico es capaz de alimentar la carga en ausencia de red.

Depende de varios parámetros como el autoconsumo del SAI debido a las pérdidas que se generan en sus componentes, también depende de la carga que se desea alimentar, de la temperatura ya que las baterías son muy sensibles a este parámetro como hemos dicho con anterioridad, así como del ciclo de vida de las baterías que con el paso del tiempo verán mermada su capacidad.

Se puede dotar al sistema de unas baterías externas para aportar un tiempo de servicio extra.

Para hacer el cálculo de la autonomía del SAI debemos tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Consumo total de la carga (Potencia de carga) que queremos alimentar en W, la cual calcularemos más adelante, dicho consumo dependerá del porcentaje de carga que queramos alimentar y por tanto esto afectará a la autonomía del SAI, no es lo mismo alimentar el total de la carga que la mitad. Para nuestro estudio como ya veremos más adelante, la potencia máxima a suministrar a la carga será de 756W.
- Potencia total de nuestro SAI en W, partiendo de la condición que como bien dice el título de este trabajo, nuestro SAI sea de 2000VA, de esta manera, considerando un factor de potencia de 0,6 seremos capaces de suministrar una potencia de: $2000 \times 0,6 = 1200W$.
- Tiempo de servicio a máxima potencia que nos permiten las baterías, para ello, escogemos unas baterías que nos permitan dar respaldo de un tiempo de 17 minutos a máxima potencia.

Con todo esto la autonomía del SAI será:

$$\text{tiempo de respaldo}(min) = \frac{\text{Potencia del SAI}}{\text{Potencia de carga}} \times 17 \text{ min} \quad (1)$$



Por tanto, la autonomía de nuestro SAI alimentando el 100% de la carga conectada será de **27 minutos** considerando la potencia máxima de la carga por lo que generalmente aguantará algún minuto más.

4.3.-Topología escogida del SAI

Se ha decidido dotar al SAI de una topología “ON-LINE” de entre todas las explicadas anteriormente, las razones son las siguientes:

Esta topología, además de proteger contra un apagón, mantiene los valores de tensión y frecuencia dentro de unos límites protegiendo la carga de subidas y bajadas de tensión en la alimentación además de proteger contra otros problemas que pueda haber con la red eléctrica.

Puede actuar como un convertidor de frecuencia 50/60 Hz y 60/540 Hz.

Debido a estos factores y su capacidad de acondicionamiento en la alimentación de las cargas conectadas el SAI ON-LINE es la mejor opción para para sitios remotos de telecomunicaciones móviles y sistemas de procesamiento críticos de voz y datos donde puede haber un alto riesgo de daños causados por relámpagos locales y transitorios de alta energía.

En caso de que por cualquier motivo perdamos el suministro eléctrico, esto no causará que nuestro SAI tenga que cambiar de modo de trabajo, como ocurriría con el SAI offline. El tiempo de reacción que necesita el SAI para alimentar nuestros equipos desde la batería es de 0 ms.

Proporcionará una protección totalmente continua, activa a fallas tanto de la red eléctrica como de algún elemento del propio SAI.

El SAI On-line suele utilizarse en aplicaciones industriales, sistemas de telecomunicaciones remotos, en medicina, aplicaciones militares etc.

Por último, hay que destacar que esta topología permite conectar nuevos módulos en paralelo a los existentes para aumentar la potencia y autonomía del SAI con mucha facilidad por lo que podemos agregar nuevas cargas sin necesidad de cambiar la instalación por completo.



4.4.-Potencia de la carga conectada al SAI

Como ya hemos dicho, podemos aumentar la potencia de nuestro SAI fácilmente, no obstante, para este trabajo tenemos la limitación en 2000VA de potencia aparente.

Normalmente, escogeremos la potencia del SAI en función de la carga que queramos conectar, pero como en nuestro caso nos limitan la potencia, escogeremos la carga a conectar en base a la potencia que podemos dar de 2000VA.

A continuación, se escogerán las cargas que irán conectadas y que por tanto quedarán protegidas por nuestro SAI.

He decidido realizar este diseño para proteger equipos informáticos pues actualmente considero que cada vez existen más dispositivos capaces de almacenar grandes cantidades de datos en tiempo real y la información hoy en día es el nuevo oro por lo que dichos equipos deben permanecer debidamente protegidos a fallas.

Se ha elaborado una estimación de la potencia necesaria de estos equipos informáticos en función de su procesador y del porcentaje de carga al que trabajan, siempre poniendo el peor de los casos, es decir, trabajando a plena carga:

- 2 equipos de alta gama con tarjeta gráfica media, consumo máximo de 300W a plena carga. Normalmente trabajará a 150W.
- Servido web con un consumo de 20W.
- 2 monitores LCD consumo máximo de 47,5W y normal de 30W.
- Router con consumo máximo de 12W.
- 1 impresora industrial consumo máximo de 29W.

La potencia de carga total a suministrar en el caso más desfavorable será de 756W.

Los SAI actuales suelen llevar una cierta cantidad de baterías de 12V y 9Ah en función de la potencia, nuestro SAI llevará 3 baterías de este tipo conectadas en serie dando un total de 36V y 9Ah.

Como nuestro SAI es de 2000VA, es decir, 1200W ya que consideramos un factor de potencia de 0,6 normalmente usado en SAI destinados a proteger equipos informáticos, de este modo:

$$\text{Energía} = \text{Tensión} \times \text{Corriente} \times \text{Tiempo} = 36V \times 9Ah \approx 324Wh.$$



Esto quiere decir, que en 1 hora es capaz de suministrar 324W, por lo que en media hora suministra el doble de potencia y en 15 minutos suministra 4 veces esa potencia, de esta manera haciendo los cálculos interpolando nos sale que nuestro SAI es capaz de suministrar aproximadamente 762W en los 27 minutos de autonomía, lo cual es un poco más de los 756W de máxima potencia que se pueden requerir en la carga conectada.

4.5.-Interruptores de potencia

En electrónica de potencia existen varios semiconductores que se comportan como un interruptor ideal, sus rasgos identificativos son:

- Control de tensión directa e inversa cuando está apagado.
- Conducción de corrientes grandes con una caída de tensión nula cuando están encendidos.
- Control instantáneo de encendido y apagado mediante señales usando una baja potencia.
- Impedancia cero en conducción e infinita en corte.

Estos semiconductores de potencia pueden dividirse en:

- Diodos, controlados por el circuito de potencia con lo cual estarían encasillados como interruptores no controlables.
- Tiristores, encendidos por señales de control y apagados por el circuito de potencia con lo cual serían interruptores semicontrolables como el SCR.
- Interruptores controlables como el GTO, el transistor bipolar (BJT), el MOSFET y el IGBT, los cuales son encendidos y apagados mediante una señal de control.

Estudiamos algunas características de los semiconductores más empleados:

4.5.1.- Rectificador controlado de Silicio SCR

El rectificador controlado unidireccional de silicio es un tipo de tiristor formado por cuatro capas de material semiconductor con estructura PNPN o bien NPNP.

Un SCR posee tres conexiones: ánodo, cátodo y gate (puerta). La puerta es la encargada de controlar el paso de corriente entre el ánodo y el cátodo. Funciona básicamente como un diodo rectificador controlado, permitiendo circular la corriente en un solo sentido. Mientras no se aplique ninguna tensión en la puerta del SCR no se inicia la conducción y en el instante en que se aplique dicha tensión, el tiristor comienza a conducir. Trabajando en corriente alterna el SCR se desexcita en cada alternancia o semiciclo. Trabajando en corriente continua, se necesita un circuito de bloqueo forzado, o bien interrumpir el circuito.

El pulso de conmutación ha de ser de una duración considerable, o bien, repetitivo si se está trabajando en corriente alterna. En este último caso, según se atrase o adelante el pulso de disparo, se controla el punto (o la fase) en el que la corriente pasa a la carga. Una vez arrancado, podemos anular la tensión de puerta y el tiristor continuará conduciendo hasta que la corriente de carga disminuya por debajo de la corriente de mantenimiento (en la práctica, cuando la onda senoidal cruza por cero).

Cuando se produce una variación brusca de tensión entre ánodo y cátodo de un tiristor, éste puede dispararse y entrar en conducción aun sin corriente de puerta. Por ello se da como característica la tasa máxima de subida de tensión que permite mantener bloqueado el SCR. Este efecto se produce debido al condensador parásito existente entre la puerta y el ánodo.



Figura 28 SÍMBOLO Y FORMA DEL SCR

Funcionamiento del SCR:

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

I_{B1} es la corriente base del transistor Q1 y causa que exista una corriente de colector de Q1 (I_{C1}) que a su vez alimenta la base del transistor Q2 (I_{B2}), este a su vez causa más corriente en I_{C2} , que es lo mismo que I_{B1} en la base de Q1. Este proceso regenerativo se repite hasta saturar Q1 y Q2 causando el encendido del SCR.

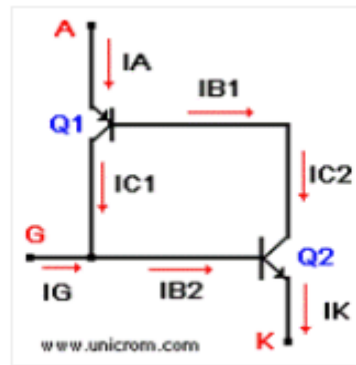


Figura 29 CIRCUITO DE UN SCR

En el SCR, la llamada compuerta (gate), determina cuándo el rectificador conmuta del estado de circuito abierto al de circuito cerrado. No es suficiente sólo la polarización directa del ánodo al cátodo del dispositivo.

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

En resumen, el SCR es un elemento unidireccional y sólo conduce corriente en un sentido, cuando el elemento esté polarizado en sentido directo y en el caso de que esa polarización sea inversa, el elemento estará bloqueado. El paso a conducción se inicia con polarización directa entre ánodo y cátodo, en el instante que se aplica un impulso positivo de corriente en el terminal de puerta. Una vez cebado, la puerta pierde el control y seguirá conduciendo. Se podrá bloquear invirtiendo la tensión ánodo-cátodo o abriendo el circuito principal.

Requiere poca corriente de puerta para el disparo de una gran corriente directa, puede bloquear ambas polaridades de una señal alterna, bloquea altas tensiones y tiene caídas de tensión pequeñas en directa.

Por el contrario, el apagado no es controlado, puede dispararse por ruidos de tensión y no soporta grandes temperaturas ni frecuencias de operación. [14]

4.5.2.- Tiristor desactivado por compuerta GTO

Actúan como interruptores unidireccionales completamente controlables, los cuales pueden ser encendidos o apagados en cualquier momento con una señal de compuerta positiva o negativa respectivamente, tienen bajas pérdidas de conducción y suelen ser usados en aplicaciones de baja y media frecuencia.

CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL GTO

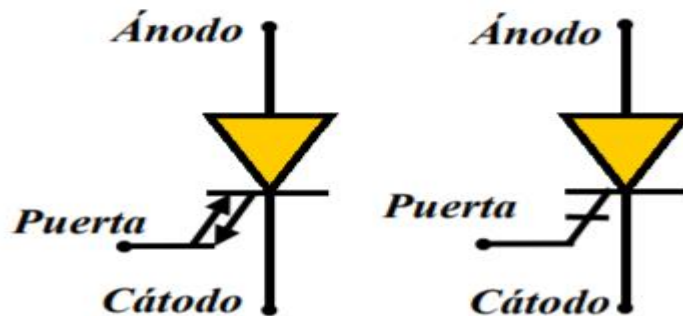
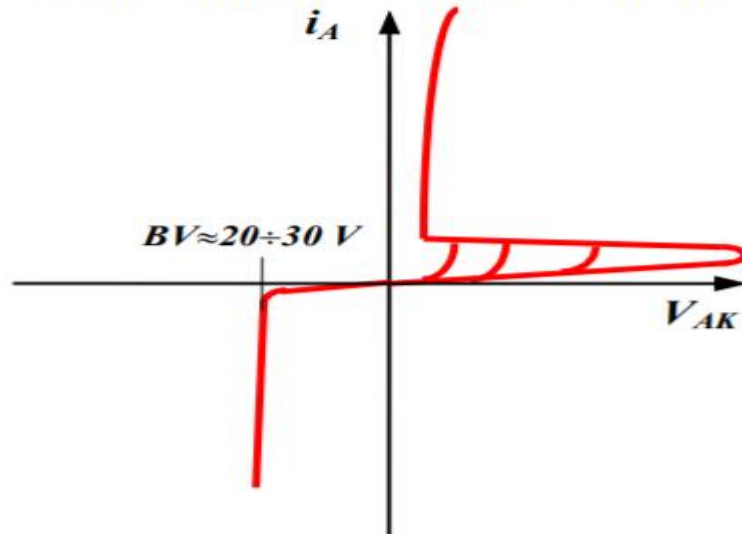


Figura 30 CARACTERÍSTICA ESTÁTICA Y SÍMBOLO DE UN GTO

Su estructura es similar al SCR con 4 capas de Silicio PNPN y 3 terminales: ánodo, cátodo y puerta.

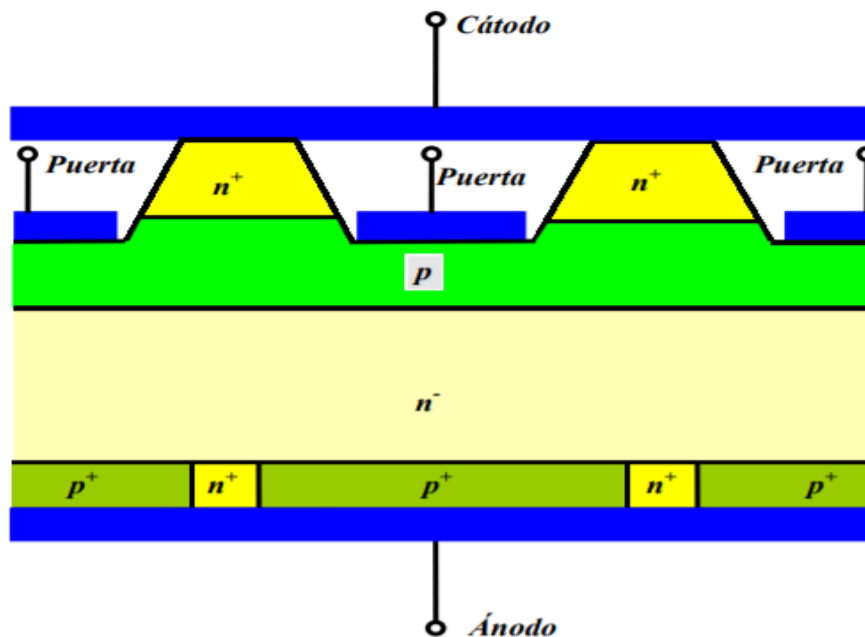


Figura 31 SECCIÓN DE UN GTO

Las principales diferencias con el SCR son:

- Interconexión de capas de control (más delgada) y catódicas, minimizando distancia entre puerta y centro de regiones catódicas y aumentando el perímetro de las regiones de puerta.
- Ataque químico para acercar el contacto de puerta al centro de las regiones catódicas.
- Regiones n^+ que cortocircuitan regiones anódicas:
 - Acelerar el apagado.
 - Tensión inversa de ruptura muy baja.

Funcionamiento:

Puede activarse aplicando una señal positiva en la puerta y desactivarse mediante una señal negativa en la misma.

Cuando el terminal del ánodo es positivo frente al cátodo, aplicando una corriente de compuerta positiva, la inyección de corriente de agujero desde la entrada de la puerta polariza la unión de base P del cátodo. Esto da como resultado la inyección de electrones e induce la inyección de agujeros, esta inyección continua hace que el GTO entre en conducción.

Para apagarlo se realiza la operación contraria, aplicando una polarización inversa en la compuerta haciendo que esta sea negativa con respecto al cátodo.

Sus principales aplicaciones están en la industria como control de motores, tracción eléctrica, rectificadores, inversores etc. [15] Y [16]

4.5.3.- Transistores bipolares BJT

Los transistores bipolares son el resultado de añadir una segunda región P o N a la unión PN de los diodos, dando lugar a transistores PNP o NPN. Estos transistores constan de tres terminales denominados colector, emisor y base.

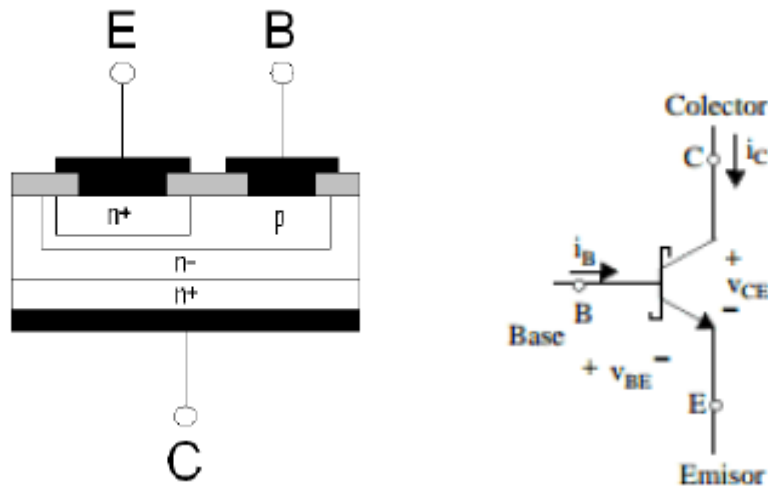


Figura 32 SECCIÓN Y SÍMBOLO DE UN BJT

Como se ve en la curva característica de la figura de abajo la corriente del colector es proporcional a la de base.

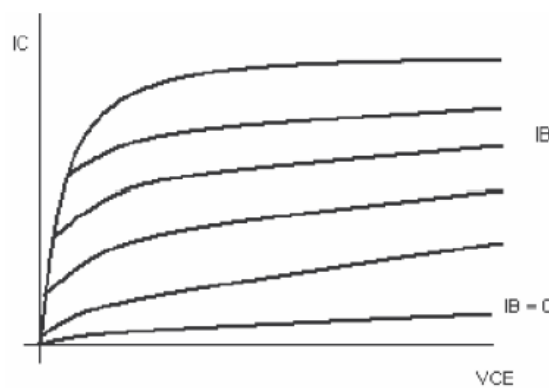


Figura 33 CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA DE UN BJT

En estos transistores se distinguen tres regiones de operación: región de corte, activa y de saturación. En la región de corte, la corriente de base es tan pequeña que no permite el encendido del transistor. En la región activa, el transistor actúa como un amplificador, donde la corriente por la base se amplifica por una ganancia y la tensión v_{CE} entre el colector y el emisor disminuye con la corriente de base, por tanto, tiene dos funcionalidades principales, como interruptor y como amplificador.

En la región de saturación, la corriente de base es tan alta que la tensión entre el colector y el emisor es muy pequeña. Por tanto, debido a que en electrónica de potencia los transistores suelen trabajar a modo de interruptores, esto es, en las regiones de saturación y corte para los BJT. [17] y [18]

4.5.4.- Transistores de efecto de campo MOSFET

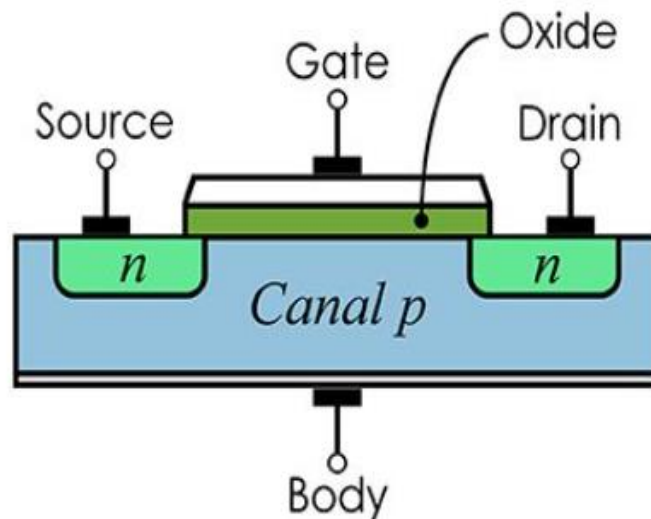
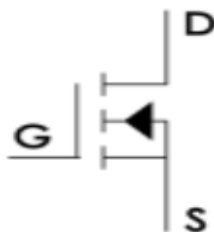


Figura 34 SECCIÓN DE UN MOSFET

MOSFET Canal N



MOSFET Canal P

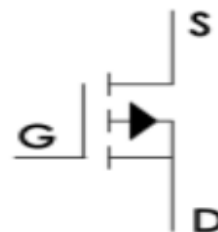


Figura 35 SÍMBOLOS DE UN MOSFET

Los MOSFET poseen también 3 terminales: Gate, Drain y Source (compuerta, drenaje y fuente). A su vez, se subdividen en 2 tipos, los MOSFET canal N y los canales P como vemos en la figura 36.

Si la tensión entre los terminales de puerta y fuente V_{GS} es lo suficientemente grande, la intensidad a través del drenador es muy elevada y el dispositivo siempre se encontrará en funcionamiento. Si, por el contrario, la tensión V_{GS} resulta más pequeña que un valor umbral $V_{GS}(th)$, el transistor MOSFET se encontrará apagado.

Los transistores MOSFETs requieren para su funcionamiento la aplicación permanente de una tensión de magnitud apropiada entre sus terminales de puerta y fuente. Por el terminal de puerta no fluye corriente alguna, excepto durante las transiciones entre el encendido y apagado y viceversa, en la que la capacidad de puerta se carga y se descarga. Estos tiempos de conmutación son muy cortos, comprendidos en el rango de unas pocas decenas de nanosegundos a unos pocos cientos de nanosegundos, dependiendo del dispositivo.

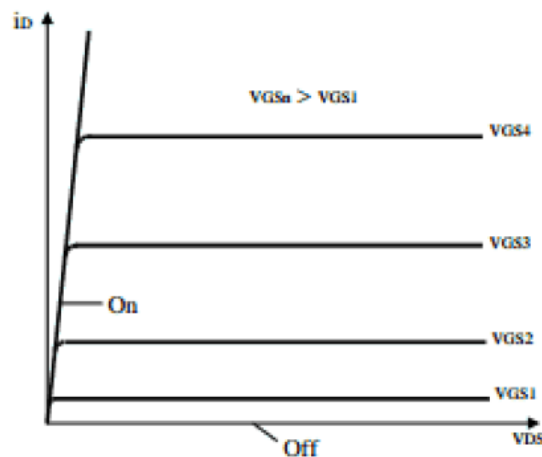


Figura 36 SÍMBOLOS DE UN MOSFET

Los BJT y los MOSFETs poseen características que se complementan entre sí en muchos aspectos. Así, los BJT poseen menores pérdidas en conducción, pero poseen tiempos de conmutación mayores, especialmente durante el apagado del dispositivo. Los MOSFETs, sin embargo, pueden encenderse y apagarse más rápidamente, pero poseen mayores pérdidas en conducción. Además, la capacidad para bloquear grandes tensiones y conducir grandes intensidades es mejor en los BJT que en los MOSFETs.

Con pequeñas potencias pueden trabajar a altas frecuencias hasta el orden de GHz. [19]

Parámetros	Bipolar	MOS
Control	Por corriente de base	Por tensión VGS
Pérdidas en conducción	Pequeñas 1-2V	Grandes 3-4V
Pérdidas en conmutación	Moderadas porque hay que extraer las cargas de la base	Bajas, retardos debidos a las capacidades parásitas
I max permitida	200A	50A
Vmax bloqueo	2000V	1000V
Capacidad de sobrecarga	Baja	Alta
Capacidad de sobretensiones	Baja	Baja
SOA	Limitado por avalancha primaria y secundaria	Limitado por la potencia de disipación máxima
Robustez mecánica	Moderada	Alta
Estabilidad térmica	Regular	Alta
Frecuencia de trabajo	Baja (10-80 Khz)	Alta (100-500 Khz)
Coste	Medio	Alto

Figura 37 COMPARACIÓN ENTRE BJT Y MOSFET

4.5.5.- Transistores bipolares de puerta aislada IGBT

Se trata de un dispositivo semiconductor diseñado para controlar grandes potencias eléctricas.

El IGBT es un dispositivo semiconductor de cuatro capas que se alternan (PNPN) que son controlados por un metal-óxido-semiconductor (MOS), estructura de la puerta sin una acción regenerativa. Un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) celular se construye de manera similar a un MOSFET de canal n vertical de poder de la construcción, excepto la n se sustituye con un drenaje + p + capa de colector, formando una línea vertical del transistor de unión bipolar de PNP.

Este dispositivo posee las características de las señales de puerta de los transistores de efecto campo con la capacidad de alta corriente y bajo voltaje de saturación del transistor bipolar, combinando una puerta aislada FET para la entrada de control y un transistor bipolar como interruptor en un solo dispositivo. El circuito de excitación del IGBT es como el del MOSFET, mientras que las características de conducción son como las del BJT. En la figura II se observa la estructura interna de un IGBT, el mismo cuenta con tres pines Puerta (G), Emisor © y Colector ©.

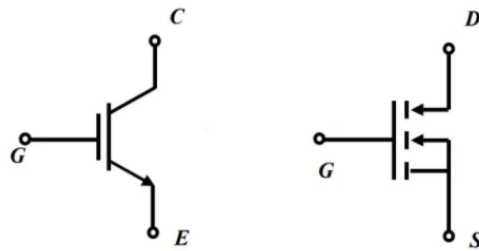


Figura 38 REPRESENTACIÓN IGBT

Cuando se le es aplicado un voltaje V_{GE} a la puerta, el IGBT enciende inmediatamente, la corriente de colector I_C es conducida y el voltaje V_{CE} se va desde el valor de bloqueo hasta cero. La corriente I_C persiste para el tiempo de encendido en que la señal en la puerta es aplicada. Para encender el IGBT, el terminal C debe ser polarizado positivamente con respecto a la terminal E. La señal de encendido es un voltaje positivo V_G que es aplicado a la puerta G.

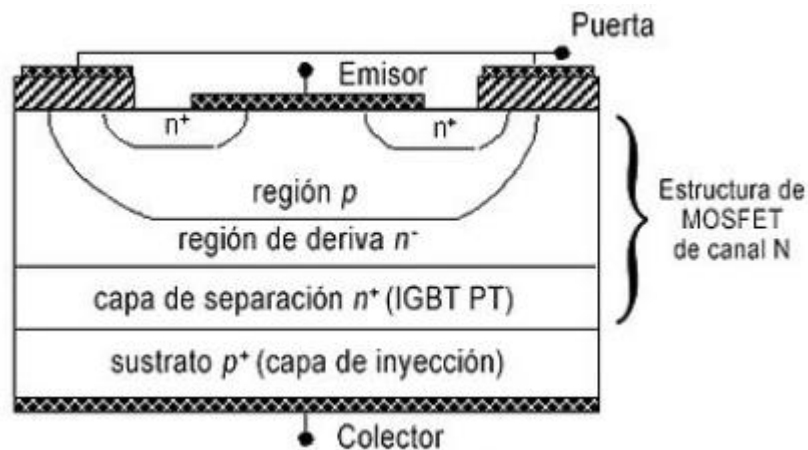


Figura 39 SECCIÓN DE UN IGBT

Este voltaje, si es aplicado como un pulso de magnitud aproximada de 15 volts, puede causar que el tiempo de encendido sea menor a 1 s, después de lo cual la corriente de colector I_D es igual a la corriente de carga I_L (asumida como constante). Una vez encendido, el dispositivo se mantiene así por una señal de voltaje en el G. Sin embargo, en virtud del control de voltaje la disipación de potencia en la puerta es muy baja.

El IGBT se apaga simplemente removiendo la señal de voltaje V_G de la terminal G. La transición del estado de conducción al estado de bloqueo puede tomar apenas 2 microsegundos, por lo que la frecuencia de conmutación puede estar en el rango de los 50 kHz.

EL IGBT requiere un valor límite VGE (TH) para el estado de cambio de encendido a apagado y viceversa. Este es usualmente de 4 V. Arriba de este valor el voltaje VCE cae a un valor bajo cercano a los 2 V. Como el voltaje de estado de encendido se mantiene bajo, el G debe tener un voltaje arriba de 15 V, y la corriente IC se autolimita.

Existen en el mercado transistores IGBT que soportan hasta 600 Amperios, pueden trabajar con tensiones superiores a los 3.000 voltios y a temperaturas por encima de los 150 °C.

Dada su capacidad, se suelen emplear en dispositivos convertidores de potencia eléctrica, como Variadores de Frecuencia, automoción y sistemas de transporte eléctricos, ascensores, Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI/UPS), electrodomésticos, etc. [20] y [21]

4.6.-Filtrado de armónicos

El filtrado de salida consiste principalmente en la supresión de perturbaciones mediante la atenuación débil (idealmente nula) de la frecuencia fundamental y la atenuación fuerte de las componentes no deseadas que son de mayor frecuencia mediante un filtro pasabajos.

Para este cometido principalmente se utilizan principalmente elementos pasivos, mayormente inductancias y capacidades, sobretodo en elementos de potencia ya que las resistencias perjudicarían notablemente al rendimiento.

Existen dos tipos de configuraciones principales que son la configuración en π y en T que a su vez se dividen en secciones L.

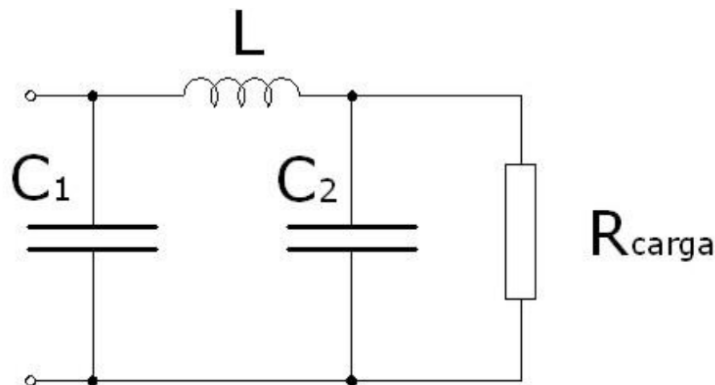


Figura 40 EJEMPLO DE FILTRO EN π

El filtro en π está compuesto por dos ramas paralelo unida a una serie y el filtro en T por dos ramas serie unida a una paralela.

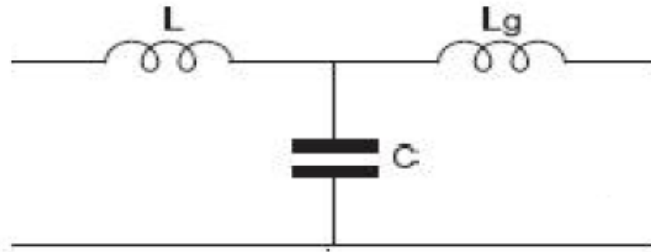


Figura 41 EJEMPLO DE FILTRO EN T

El número de inductancias y condensadores establece el orden del filtro que determina la evolución de la pendiente del módulo con respecto a la frecuencia siendo superior para mayor orden.

La inductancia en serie del filtro además sirve para limitar la corriente en caso de cortocircuito.

Se pueden distinguir dos configuraciones en cuanto a su función:

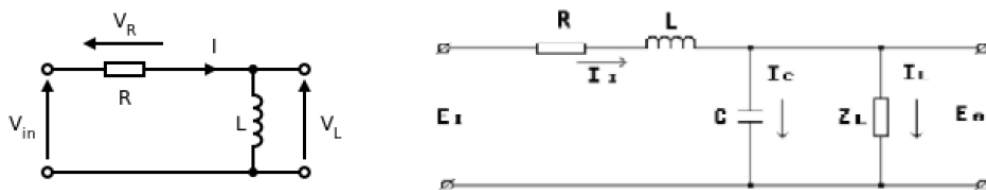


Figura 42 EJEMPLO DE FILTRO DE CORRIENTE (IZQDA) Y DE TENSIÓN (DCHA)

-Filtro de corriente: tiene una inductancia en el circuito en serie.

-Filtro de tensión: tiene una capacidad en el circuito paralelo.

4.7.-Diseño del SAI

4.7.1.- Sistema Rectificador. Tipos. Dimensionado y Simulaciones.

El rectificador se encarga de pasar de tensión alterna procedente de la red eléctrica a tensión continua de forma que mantenga cargadas las baterías del SAI y así su autonomía sea lo mayor posible.



Si se tiene un SAI on-line como es el caso, el rectificador además alimenta al inversor para proporcionar energía a las cargas conectadas cuando hay red eléctrica.

Cuando las baterías están descargadas debido a cualquier fallo de red eléctrica, el rectificador las recarga; cuando se da la situación contraria, es decir, que las baterías estén cargadas, el rectificador se encarga de mantenerlas en su tensión de flotación para que no se descarguen.

Existen rectificadores que utilizan elementos SCR para controlar su puesta en conducción y otros que utilizan diodos semiconductores por lo que no se puede controlar su puesta en conducción.

Un diodo es un dispositivo semiconductor que actúa esencialmente como un interruptor unidireccional para la corriente. Permite que la corriente fluya en una dirección, pero no en la opuesta.

Por otra parte, un SCR (rectificador controlado de silicio) es un componente electrónico que al igual que el diodo semiconductor permite la circulación de la corriente en un solo sentido, pero con el añadido de que solo se pone en conducción cuando su terminal de puerta (tercer terminal, añadido del diodo que solo posee dos terminales) tiene aplicada una determinada tensión.

Una vez que se pone en conducción, aunque se anule la tensión aplicada en la puerta el SCR seguirán conduciendo hasta que la corriente de carga que circula por él caiga por debajo de la de mantenimiento, con lo anterior se deduce que, si se quiere controlar también el corte en este componente, se necesitará de una circuitería auxiliar conocido como circuito de bloqueo forzado. [22]

A continuación, expondré los tipos de rectificadores más usados:

4.7.1.1.- TIPOS DE RECTIFICADORES

MONOFÁSICOS:

- Rectificador monofásico de media onda:

Cuando la corriente de red comience a producir la onda senoidal, el diodo sólo permitirá que pase corriente a la carga R mientras éste sea polarizado directamente, es decir, cuando al ánodo del diodo se le aplique una polaridad positiva.

Durante el semiperiodo negativo el diodo no conducirá, por lo que la carga no será alimentada, y en ese caso habremos conseguido una corriente pulsante.



Figura 43 Onda de corriente en rect.monof. de media onda

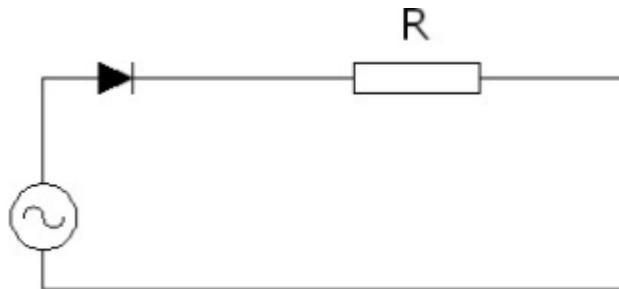


Figura 44 Esquema de rect.monof. de media onda

Es el montaje más simple. Se usa poco y sobre todo para pequeñas potencias o pequeños cargadores de baterías.

El problema de este tipo de rectificador es que el valor medio de la tensión de salida es bajo y depende de la carga, además la corriente se llega a cortar y hay tensión negativa. [23]

- **Rectificador monofásico en puente:**

Con el rectificador anterior (media onda) la tensión de alimentación valdrá 0 V durante la mitad del tiempo, es decir, siempre que se presente el semiperiodo negativo. Para solucionar este problema podemos disponer de un puente de diodos, en el que se rectifique por un lado el semiperiodo positivo y por otro el semiperiodo negativo, de forma que la carga siempre esté alimentada.

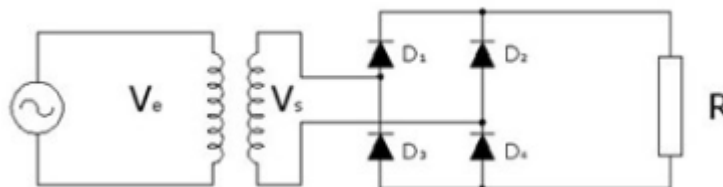


Figura 45 Esquema de rect.monof. en puente

En este caso, los diodos 1 y 4 se encargarán de conducir el semiperiodo positivo ya que en ese caso al ánodo de dichos diodos les llegará tensión

positiva. En el caso de los diodos 2 y 3 pasará, al contrario, de esta manera nos queda un flujo de corriente tal que así:

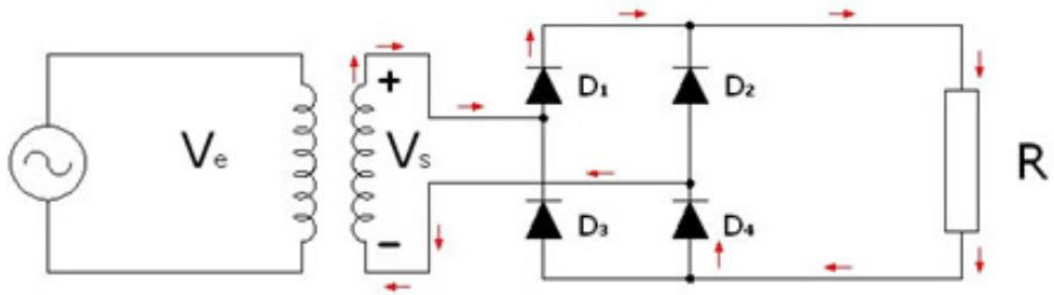


Figura 46 Semiciclo positivo en puente rectificador

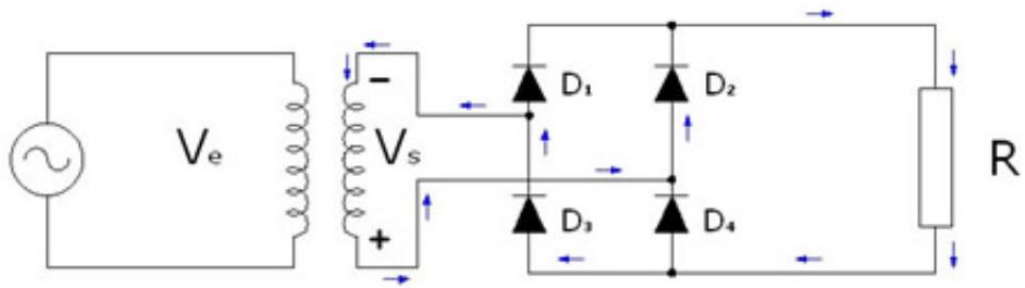


Figura 47 Semiciclo negativo en puente rectificador

De esta manera, la carga siempre recibe positivo por el mismo sitio, independientemente de que sea el semiperiodo positivo o negativo el que se produce en la secuencia de funcionamiento. [23]



Figura 48 Tensión de rectificación onda completa en puente



Donde suponiendo conducción continua tenemos:

a) Caso no controlado:

$$U_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_M \sin(\omega t) d\omega t = \frac{V_M}{\pi} [\cos 0 - \cos(\pi)] = \frac{2V_M}{\pi}$$

b) Caso controlado:

$$U_m = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_M \sin(\omega t) d\omega t = \frac{V_M}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi + \alpha)] = \frac{2V_M}{\pi} [\cos \alpha]$$

Para mi diseño, he escogido este tipo de rectificador.

Es monofásico pues la carga considerada a alimentar es un equipo informático que se alimenta con tensión de red Fase-Neutro de 220-230V, por lo que únicamente utiliza una línea de alimentación.

Por otra parte, la topología seleccionada de puente completo se ha escogido frente al resto de topologías monofásicas principalmente por las siguientes razones:

- Es mucho más eficiente que el de media onda pues es capaz de usar el semiciclo positivo y negativo de la tensión de entrada.
- El transformador que necesitamos para este tipo de montaje no requiere que tenga toma media, por lo que la magnitud de tensión en la salida será de la misma magnitud que la tensión en la entrada con lo que la relación de transformación será menor y por tanto, el sistema será más económico.

Se usará una topología no controlada, es decir, con diodos semiconductores los cuales son los más usados en este tipo de diseños.

Tampoco emplearemos un sistema de control como el SCR pues este diseño no está destinado a una aplicación donde se requiera realizar un control preciso de la potencia a transmitir pues la salida será la entrada de un inversor donde se desea tener tensión continua por un lado y transmitir la máxima potencia posible.

TRIFÁSICOS:**- Rectificador trifásico de media onda:**

Consisten en conectar un diodo a la salida de cada arrollamiento, que se unirán en un punto común que después alimentará a la resistencia o carga del circuito. El retorno de la corriente se realiza a través de la línea de neutro.

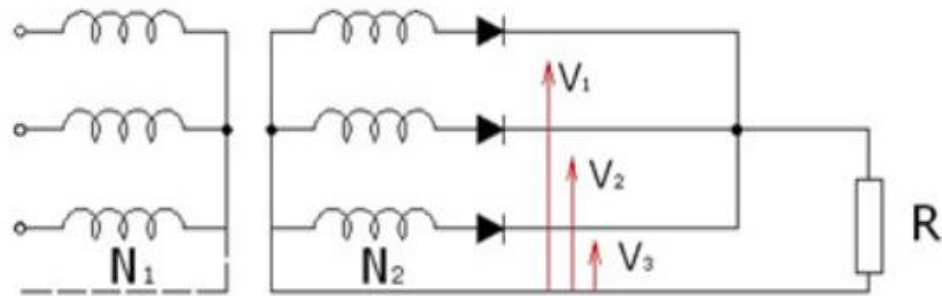


Figura 49 Topología rectificador trifásico de media onda

Es evidente que el arrollamiento secundario está dispuesto en estrella y que de la unión común de las tres bobinas se saca la línea de neutro. Además, tal y como indica la imagen, cada bobina tendrá, con respecto a neutro, las tensiones V_1 , V_2 y V_3 respectivamente, que se producirán desfasadas 120° .

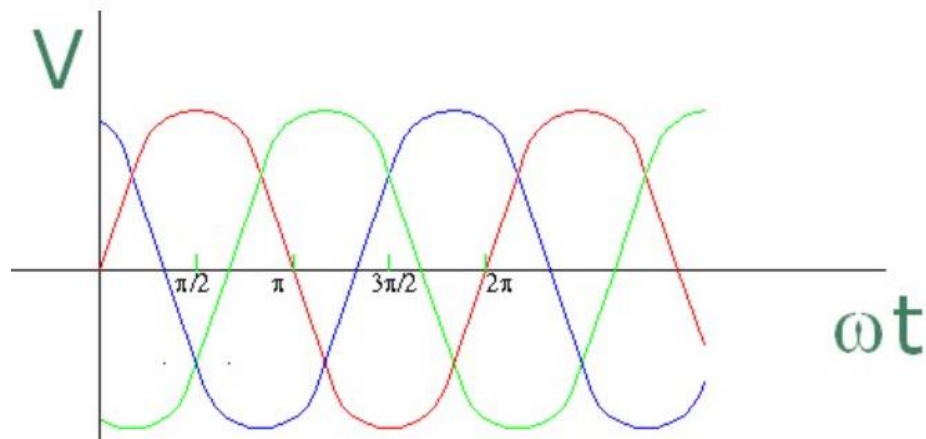


Figura 50 Tensión rectificador trifásico de media onda

Las tensiones V_1 , V_2 y V_3 están representadas en la gráfica, por las ondas roja, verde y azul. Pero en realidad, al haber colocado un diodo a cada salida, el semiciclo negativo de cada onda quedará suprimido, es decir, que la tensión que le llegue a la carga será la línea ondulada de color gris.

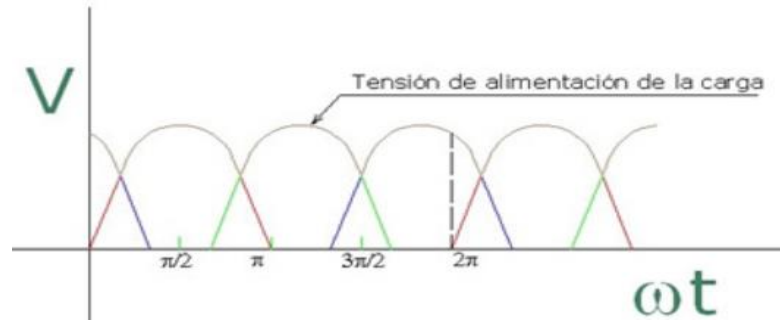


Figura 51 Tensión rectificador trifásico de media onda

Analizando la imagen anterior, podemos observar que cada bobina alimentará la carga durante $1/3$ del periodo y cada diodo estará conduciendo durante tanto tiempo como la corriente de su bobina sea superior que la de las demás. La línea de trazos de la imagen representa la duración de un ciclo, tal y como puede observarse. Como la corriente de alimentación de la carga la aportan tres bobinas en cada ciclo, esta será más continua. [23]

- **Rectificador trifásico de onda completa con fuente conectada en estrella:**

Si ahora disponemos de un puente hexadiodo, de manera que podamos rectificar el semiperiodo negativo, que antes quedaba anulado, la tensión producida será aún más continua que antes.

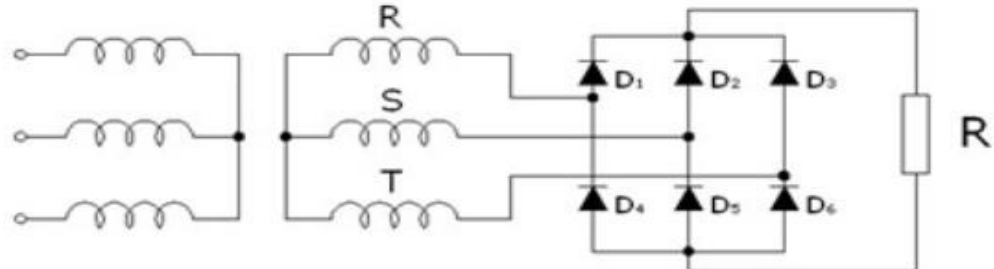


Figura 52 Topología rectificador trifásico de onda completa

Podemos observar como ahora, nuestro transformador, tiene a la salida de cada bobina dos diodos, de manera que se rectificará la onda completa. Para aclarar más aún el funcionamiento, vamos a representar las bobinas R, S y T desfasadas en el espacio 120° , pues constructivamente es como se encuentran. Imaginemos que la producción de corriente comienza en la bobina R-S (onda roja), siendo el semiperiodo positivo el que se produce a la salida de R. La corriente por tanto circulará hasta D1 que, por ser positiva, lo atravesará hasta la carga R y retornará por D5 hasta la bobina S. 180° después, se producirá el semiperiodo negativo, por lo que, al haber cambiado el sentido de la corriente, el positivo estará a la salida de la bobina S, atravesará el diodo D2 en dirección a la carga, retornando por D4 hasta la bobina R.

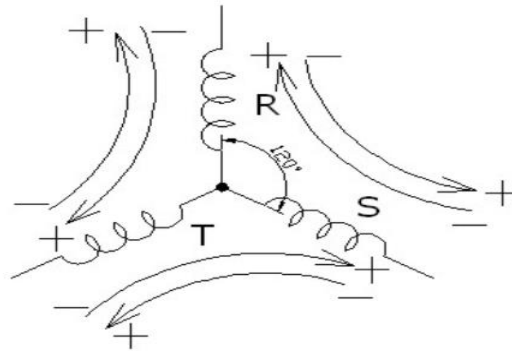


Figura 53 Conexión trifásica en estrella

Esta secuencia la repetimos para las bobinas S-T (onda verde), actuando D2 y D6 para el semiperiodo positivo y D3 y D5 para el semiperiodo negativo; y para las bobinas T-R (onda azul), en cuyo caso la secuencia será D3 y D4 para la semionda positiva y D1 y D6 para la semionda negativa.

Ya sólo queda hacer un matiz, y es que el desfase entre el semiperiodo positivo y negativo es de 180° , mientras que el desfase entre arrollamientos es de 120° , por lo que antes de que el semiciclo de una de las bobinas haya finalizado, se estará produciendo la siguiente onda en otro arrollamiento. Esto queda de manifiesto si en la representación senoidal de un transformador trifásico, se solapan los semiciclos positivos y negativos.

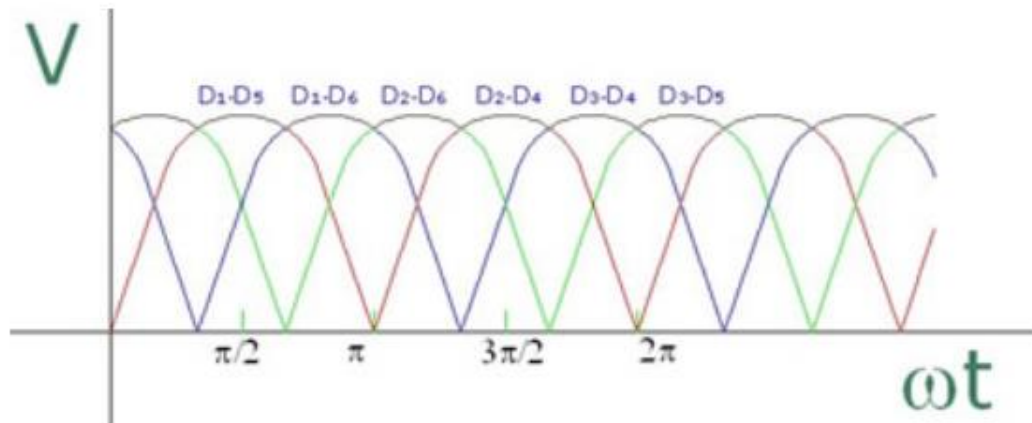


Figura 54 Tensión rectificador trifásico de onda completa

Puede apreciarse como ahora el aporte de tensión es cada $1/6$ del periodo, resultando una tensión aún más continua que antes. Si depuramos las partes de la onda que no afectan a la alimentación de la carga, resultará una señal como la que muestra la imagen inferior. [23]

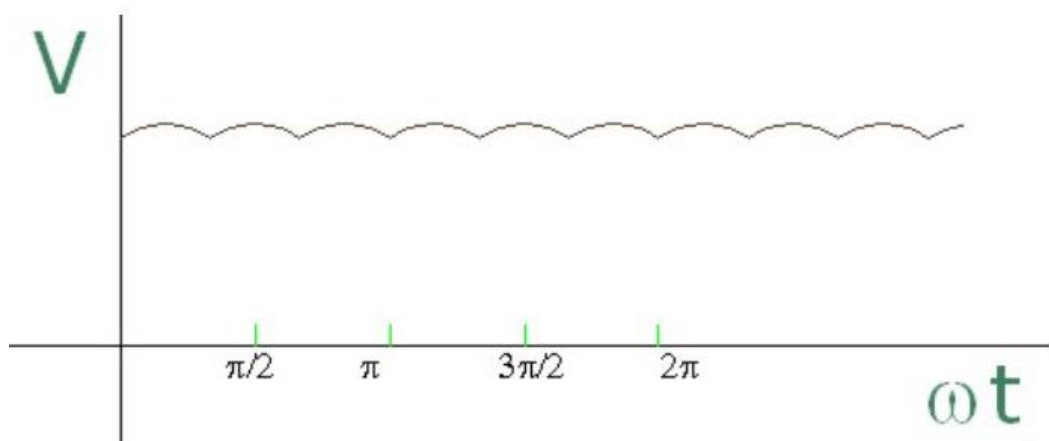


Figura 55 Señal rectificada

4.7.1.2.- DIMENSIONADO

Para el dimensionado del rectificador monofásico en puente se tendrán en cuenta 4 elementos: el diodo que permite ese cambio de tensión alterna a continua que necesitamos para cargar las baterías, el radiador el cual garantiza que la temperatura de la unión con el diodo sea la adecuada disipando calor, el transformador y el condensador de salida.

TRANSFORMADOR:

Teniendo en cuenta como veremos un poco más adelante que en el secundario del transformador necesitaremos 45,42 V para cargar las 3 baterías en serie que se pondrán a la salida del rectificador, calculamos la relación de transformación ya que sabemos que en el primario habrá 230V de la red.

En ese caso nos queda una relación de transformación de 1:6, en base a esto colocaremos nuestro transformador.

DIODOS:

Se calculan la intensidad que atraviesa el diodo y la potencia que disipa el mismo.

TENSIÓN EN SECUNDARIO E INTENSIDAD DIODOS:

Para ello, partiremos del dato final del rectificador, es decir, de los 40 V en corriente continua que queremos tener a su salida para alimentar las 3 baterías en serie.



A partir de ahí, sacamos el Vp_{out} que debería haber a la salida del rectificador:

$$V_{cc \text{ directa}} = 40V = \frac{2Vp_{out}}{\pi} \quad (1)$$

Despejando de la relación (1) sacamos que $Vp_{out} = 62,83V$

Podremos sacar entonces, la Vp_{in} que debería haber en el rectificador ya que sabemos que tendrá que ser la misma, pero añadiéndole la caída de tensión que hay en los dos diodos por los que circula la corriente en cada semiciclo como se ha explicado en el funcionamiento del rectificador:

$$Vp_{out} = 62,83V = Vp_{in} - 2 * 0,7 \quad (2)$$

Despejando de la relación (2) sacamos que $Vp_{in} = 64,23$

A partir de la última sacamos el V que debe haber en el secundario del transformador:

$$64,23 = \sqrt{2} * V_{secun} \quad (3)$$

De modo que la V_{secun} deberá ser de **45,42 V** necesarios para que a la salida del rectificador tengamos 40V de corriente continua, dato a partir del cual sacamos la relación de transformación del transformador inicial.

De este modo finalmente sacamos la intensidad que circulará por los diodos:

$$2 * Id = \frac{P_{final \text{ rectific}}}{n^{\circ} \text{ baterías} * V_{baterías}} \quad (4)$$

Donde el n° de baterías conectadas en serie es 3 como ya se ha explicado en apartados anteriores y serán de 12 V cada una.

El 2 que multiplica es debido a que la corriente circula por 2 diodos en cada semiciclo.

Y donde la $P_{final \text{ rectific}}$ escogemos que sea de 2000W a modo de rendimiento ya que se irá perdiendo en los elementos posteriores y queremos que la potencia final del SAI sea de 1200W (2000VA) impuestos por el título del TFG.

De este modo sale que la **$Id = 28 \text{ A}$** de manera que pondremos unos diodos de 40 A que puedan soportar bien dicha corriente sin calentarse demasiado.

Los diodos elegidos son del tipo VS-40HFR120 de Vishay (Datasheet en anexos).

**POTENCIA DISIPADA EN DIODOS:**

$$P_{disipada} = V_o * I_d + r_d * (\sqrt{2} * \text{Factor de forma} * I_d)^2 \quad (5)$$

Donde:

V_o es la caída de cada diodo 0,7V.

I_d es la corriente que circula por los diodos.

r_d del diodo sacada del catálogo.

El factor de forma de 1.5 el que se suele tomar en este tipo de circuito en puente monofásico.

De esta forma sacamos

$$P_{disipada} = 0,65V * 28A + 4.29m\Omega * (\sqrt{2} * 1.5 * 28A)^2 = 33,33W.$$

RADIADORES:

Elementos colocados en las uniones con los diodos para garantizar que la T^a de la unión sea la adecuada.

Usaremos las siguientes relaciones basadas en resistencias y T^a :

$$R_{th_{r-a}} = R_{th_{j-a}} - R_{th_{j-c}} - R_{th_{c-r}} \quad (6)$$

$$T_j - T_a = R_{th_{j-a}} * P_{disipada} \quad (7)$$

Donde:

$R_{th_{r-a}}$ la resistencia radiador ambiente.

$R_{th_{j-a}}$ la resistencia unión ambiente.

$R_{th_{j-c}}$ la resistencia unión caja.

$R_{th_{c-r}}$ la resistencia caja radiador.

T_j es la temperatura de la unión que será de unos 125°C (398 K).

T_a es la temperatura alrededor del equipo que será de unos 40°C (313K).

$P_{disipada}$ la potencia disipada en los diodos calculada antes.

$R_{th_{j-c}}$ y $R_{th_{c-r}}$ serán sacadas del datasheet de los diodos:

THERMAL AND MECHANICAL SPECIFICATIONS					
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	40HF(R)		UNITS
			10 to 120	140 to 160	
Maximum junction operating and storage temperature range	T _J , T _{Stg}		-65 to 190	-65 to 160	°C
Maximum thermal resistance, junction to case	R _{thJC}	DC operation	0.95		K/W
Maximum thermal resistance, case to heatsink	R _{thCS}	Mounting surface, smooth, flat and greased	0.25		
Maximum allowable mounting torque (+0 %, -10 %)		Not lubricated thread, tightening on nut ⁽¹⁾	3.4 (30)		N · m (lbf · in)
		Lubricated thread, tightening on nut ⁽¹⁾	2.3 (20)		
		Not lubricated thread, tightening on hexagon ⁽²⁾	4.2 (37)		
		Lubricated thread, tightening on hexagon ⁽²⁾	3.2 (28)		
Approximate weight			17	0.6	g oz.
Case style		See dimensions - link at the end of datasheet	DO-203AB (DO-5)		

Figura 56 Datasheet diodos

De esta manera, de la relación 7 despejamos y sacamos

$$R_{thj-a} = \frac{125-40}{33,33W} = 2,55 \text{ °C/W.}$$

Y pasamos todos los datos a la relación 6 donde nos queda:

$$R_{thr-a} = 2,55 - 0,95 - 0,25 = 1,35 \text{ °C/W.}$$

Ahora, escogemos un radiador que nos sirva fijándonos en su catálogo en la curva Resistencia - Longitud para saber de qué longitud como mínimo hay que poner dicho radiador, cabe decir que se pondrá uno por cada diodo que compone el rectificador.

MODELO PE-5

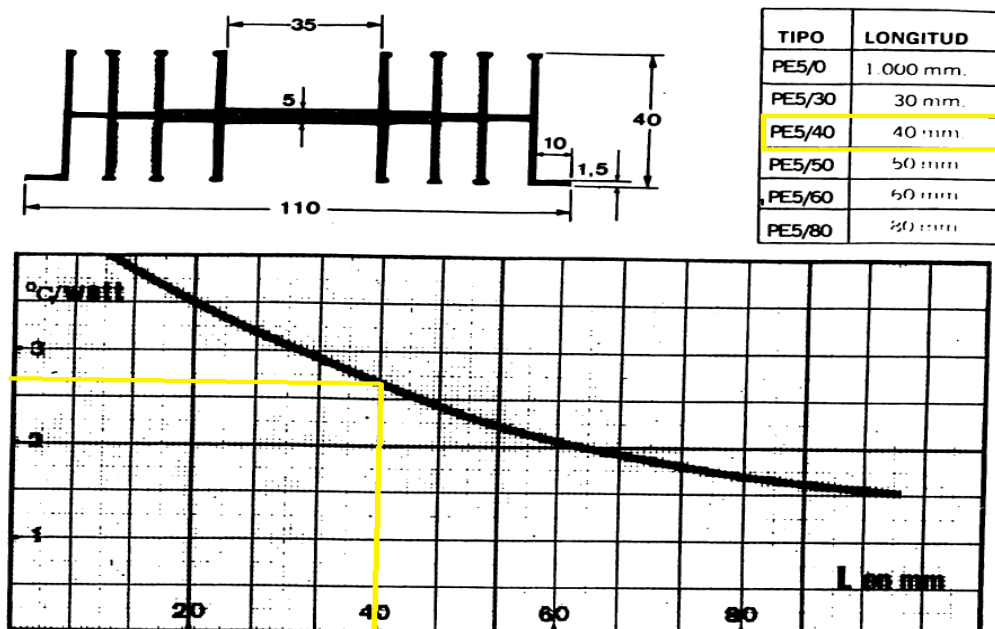


Figura 57 Catálogo radiador



De esta manera, se ha escogido el radiador PE5-40, con una longitud de 40 mm que corresponde a una $R_{th_{r-a}}$ de $2,7^{\circ}\text{C/W}$.

4.7.1.3.- SIMULACIONES

Para hacer todas las simulaciones se ha usado Simulink:

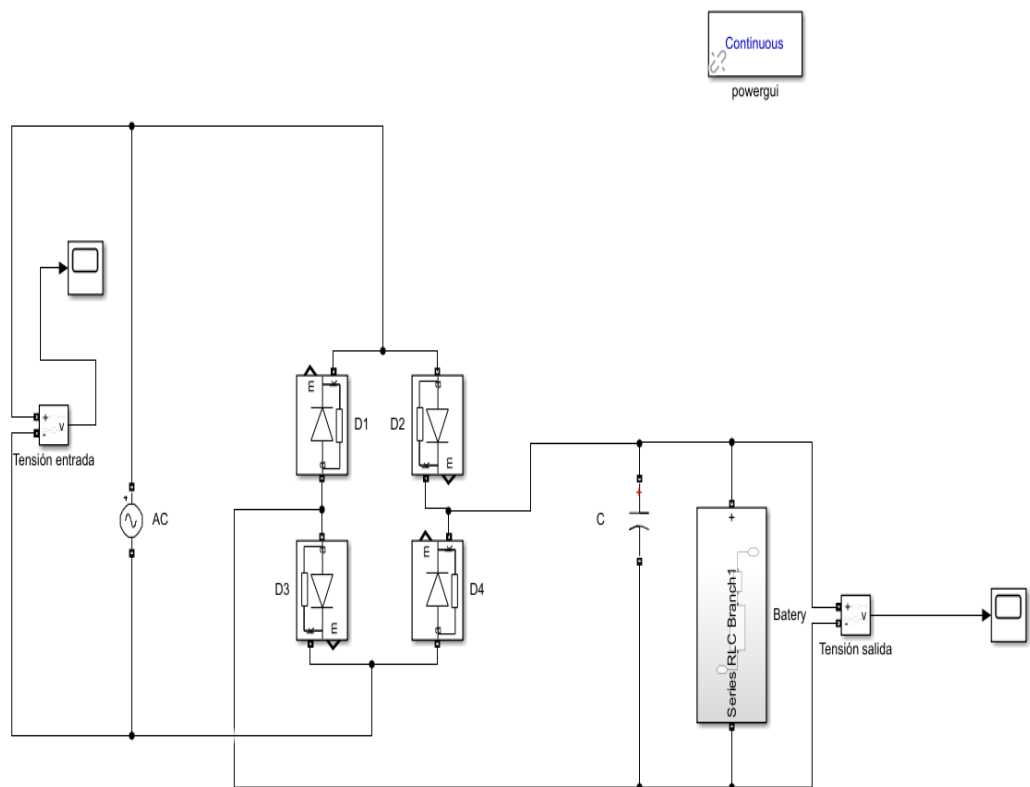


Figura 58 Sistema rectificador

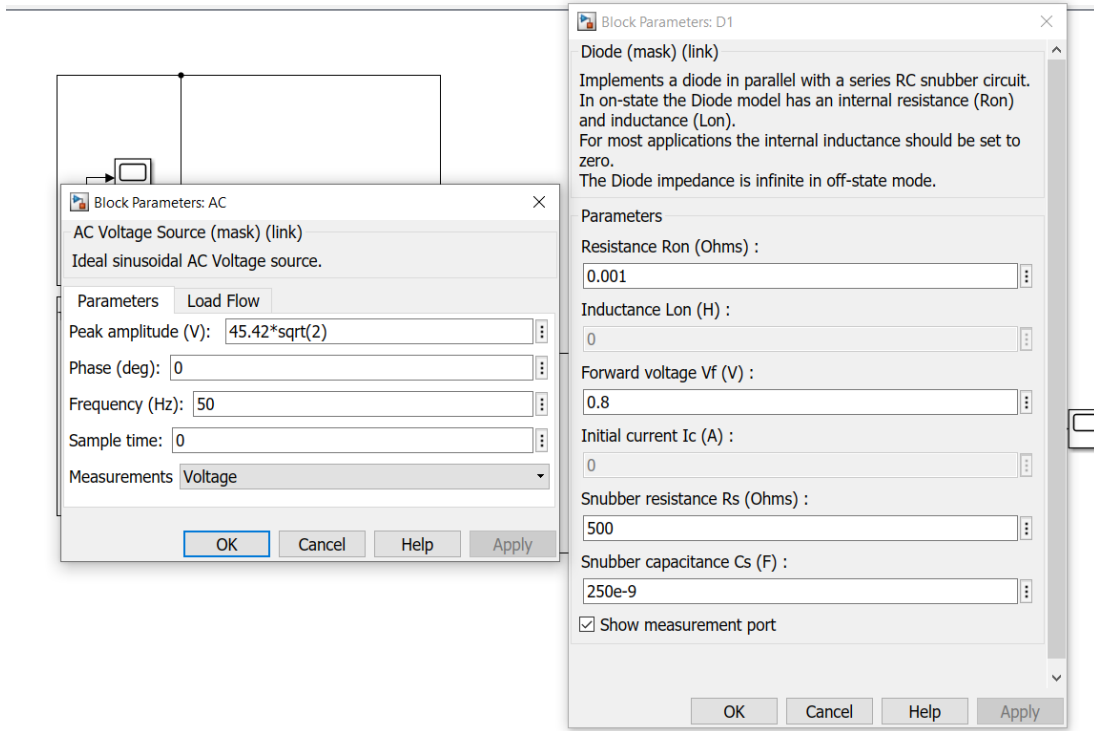


Figura 59 Parámetros de los diodos rectificadores y fuente de alimentación alterna

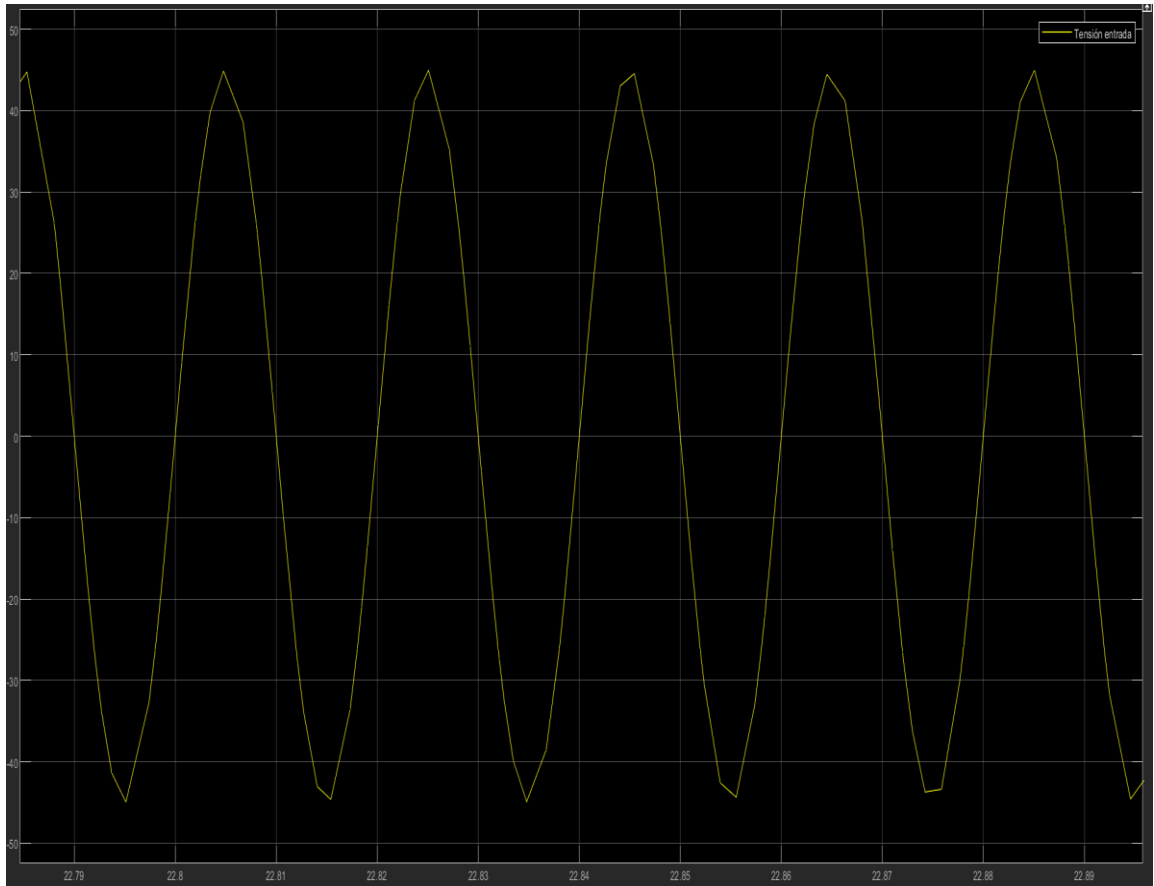


Figura 60 Tensión de entrada

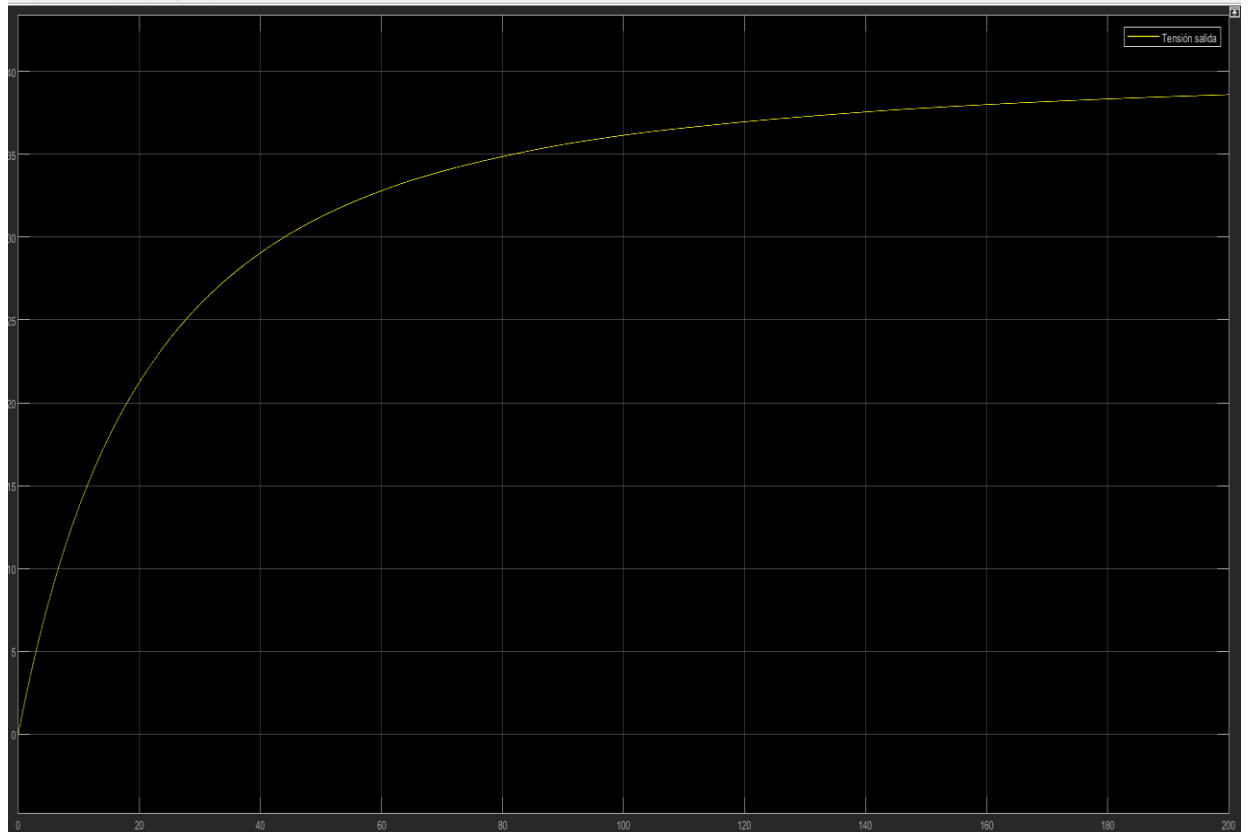


Figura 61 Tensión de salida

4.7.2.- Sistema Inversor. Tipos. Dimensionado y Simulaciones.

Un inversor es un dispositivo electrónico usado para transformar corriente continua en alterna con la peculiaridad de hacerlo a un voltaje y frecuencia determinados por el diseñador. De esta manera son muy usados para por ejemplo alimentar cargas que funcionan con energía alterna y no se dispone de la energía directa de la red por lo que podemos usar un sistema de baterías y mediante un inversor alimentar dichas cargas.

Se usan en muchas otras aplicaciones desde grupos de continuidad hasta controladores de velocidad de motores eléctricos, conmutadores de energía, iluminación etc.

Se suele usar como es nuestro caso, el grupo rectificador-inversor alimentado por corriente alterna y usado para variar voltaje y frecuencia de dicha corriente alterna en la salida en función de la de entrada.

A la salida de un inversor suele usarse un filtro paso bajo para eliminar armónicos no deseados.

En un inversor se suelen usar semiconductores como los IGBT, tiristores y TRIAC. [24]

A continuación, explicaré el funcionamiento del TRIAC ya que los tiristores y los IGBT están explicados en las páginas 37 y 42 respectivamente.

TRIAC:

El TRIAC es un componente electrónico semiconductor de tres terminales para controlar la corriente.

Podríamos decir que un triac se utiliza para controlar una carga de CA (corriente alterna), semejante a como un transistor se puede utilizar para controlar una carga de CC (corriente continua).

En definitiva, es un interruptor electrónico, pero para corriente alterna, se utilizan en muchas ocasiones como alternativas al relé.

Su funcionamiento básico es cerrar un contacto entre dos terminales (ánodo 1 y 2) para dejar pasar la corriente (corriente de salida) cuando se le aplica una pequeña corriente a otro terminal llamado "puerta" o Gate (corriente de activación).

Se seguirá permitiendo que la corriente fluya hasta que la corriente de salida disminuya por debajo de un valor determinado, llamada corriente umbral, o se corte la corriente totalmente de alguna forma, por ejemplo, con un interruptor o pulsador.

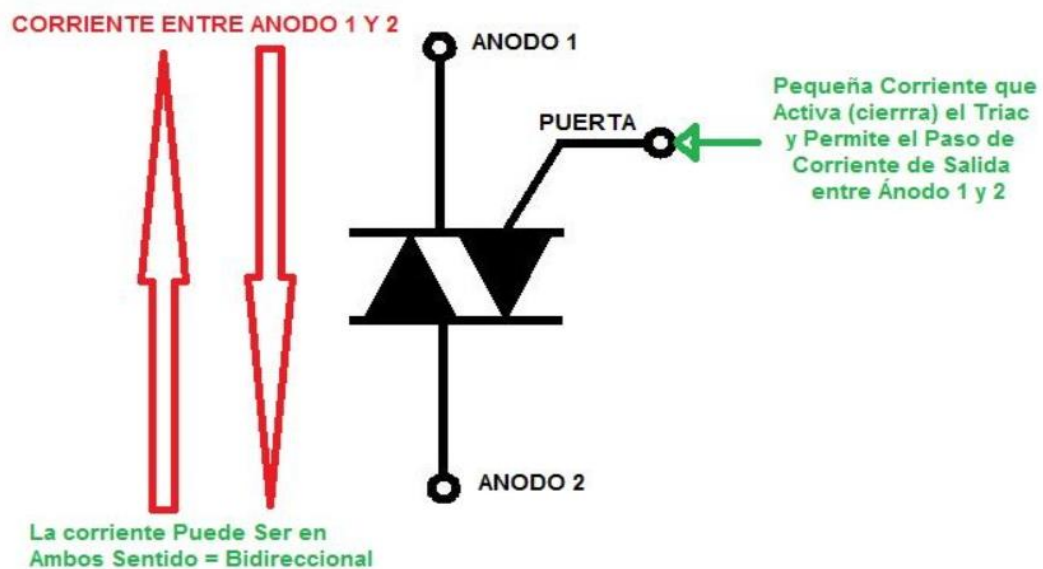


Figura 62 Símbolo TRIAC

En el ánodo 1 y 2 se coloca el elemento de salida que queremos controlar con el triac (una lámpara, motor, etc.). [25]

4.7.2.1.- TIPOS DE INVERSORES

MONOFÁSICOS:

- Inversor monofásico en semipunte:

Es la estructura más básica, se usa cuando se dispone de una tensión continua alta y para potencias de salida bajas o medias.

El tamaño de los condensadores deberá ser lo suficientemente grande para que la tensión a través de ellos pueda considerarse constante. La tensión obtenida en los terminales VA0 variará entre $V_D/2$ y $-V_D/2$ con una secuencia que dependerá de la señal de control y la señal triangular. Dada la simetría de la tensión solo tiene armónicos impares. El valor de la fundamental podrá calcularse mediante la expresión:

$$\langle V_{A0} \rangle_{pico} = \frac{V_D}{2} m_a$$

Si la frecuencia de corte del filtro ha sido seleccionada adecuadamente, la tensión aplicada a la carga será muy similar a la fundamental.

Los interruptores utilizados en el medio puente soportan una tensión igual a V_D y una corriente de pico igual a la que circula por el filtro y la carga. [26]

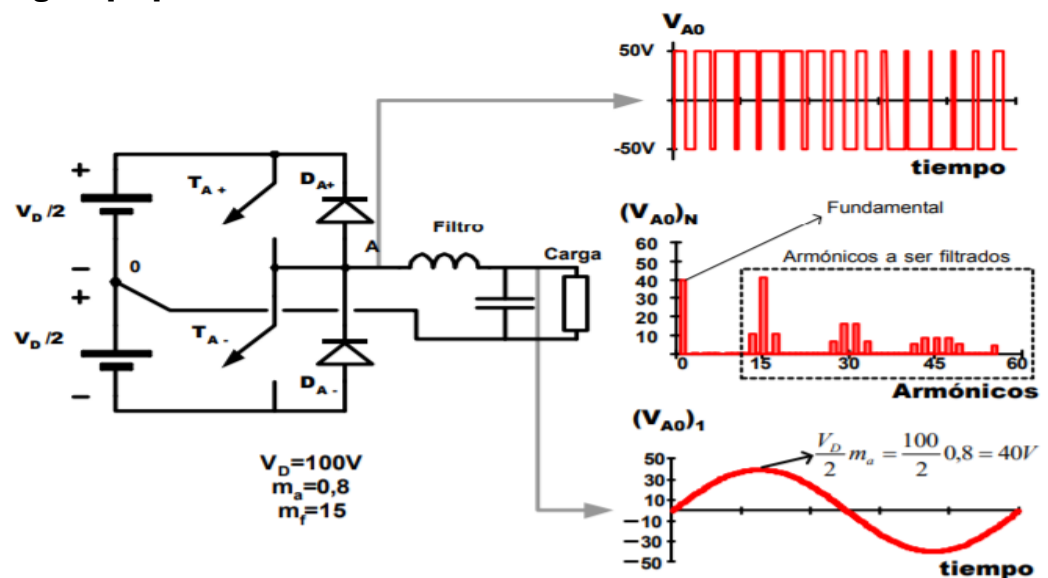


Figura 63 Inversor monofásico en semipunte esquema y formas de onda

- Inversor monofásico en puente:

Esta estructura permite obtener a la salida la máxima tensión continua de la entrada, por lo que, a diferencia de la topología anterior, para una misma potencia requiere corrientes menores y por tanto las pérdidas serán menores comparando con la topología anterior.

Sin embargo, el número de semiconductores necesarios serán el doble en comparación con las topologías de medio puente y push-pull.

Esta topología se utiliza cuando tenemos una tensión continua en la entrada baja y la potencia de la carga en la salida es alta.

La tensión máxima que deben soportar los semiconductores coincide con la tensión continua de entrada.

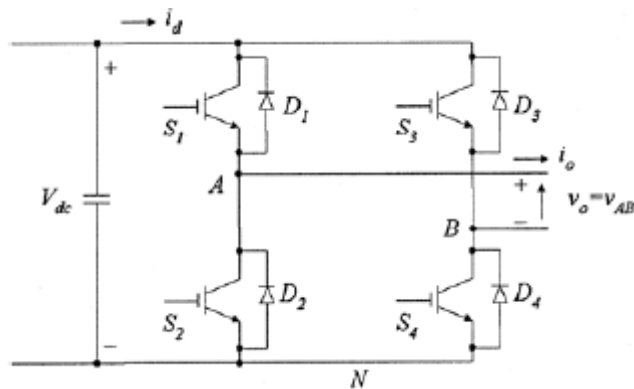


Figura 64 Inversor monofásico en puente esquema

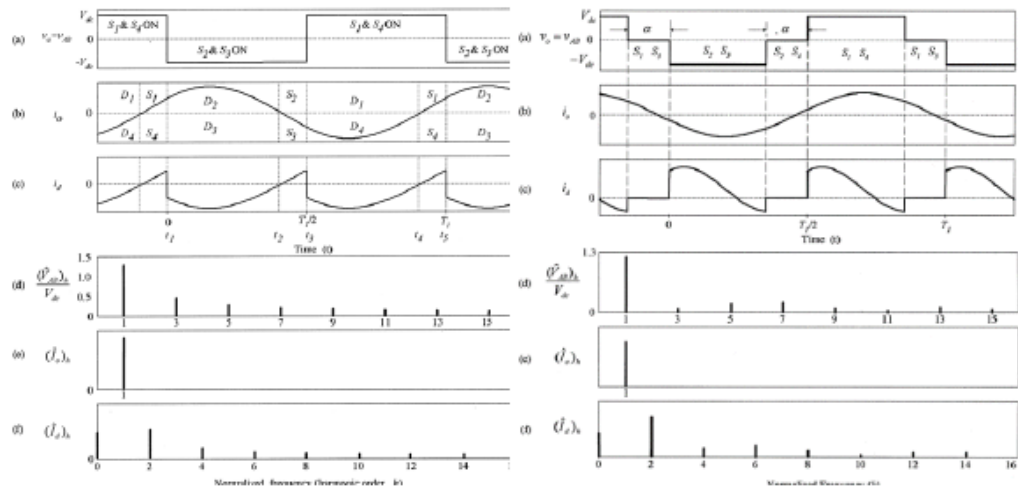


Figura 65 Inversor monofásico en puente formas de onda

Esta topología es la elegida en el inversor ya que permite una tensión de salida en 3 niveles por lo que las formas de control podrán ser mayores, también permite controlar la potencia de salida modificando el ángulo de deslizamiento para ajustar la amplitud del armónico fundamental de salida.

Por otra parte, se ha seleccionado un IGBT como interruptor de potencia frente a otros semiconductores pues nos ofrece las ventajas de los Mosfet y la capacidad de carga en corriente de los transistores bipolares BJT. Además, tiene un voltaje de saturación bajo que permite bajas pérdidas en conducción (menores que la de los Mosfet), puede trabajar con potencias mayores que un Mosfet y su control es por tensión en vez de corriente como en los transistores bipolares. [26] y [27]

- **Inversor monofásico en push-pull:**

El convertidor push-pull trabaja en el primer y tercer cuadrante. Es decir, el transformador se magnetiza y se desmagnetiza en un periodo de trabajo. Está compuesto por una especie de inversor que convierte la tensión continua en «alterna» utilizando dos transistores y un rectificador de onda completa (transformador con toma intermedia y dos diodos) y un filtro paso bajo. [27]

En este conversor tenemos 4 periodos de trabajo:

- 1- $0 < t < DT_s$: S1 ON, S2 OFF
- 2- $DT_s < t < Ts_2$: S1 OFF, S2 OFF
- 3- $Ts_2 < t < Ts_2 + DT_s$: S1 OFF, S2 ON
- 4- $Ts_2 + DT_s < t < Ts$: S1 OFF, S2 OFF

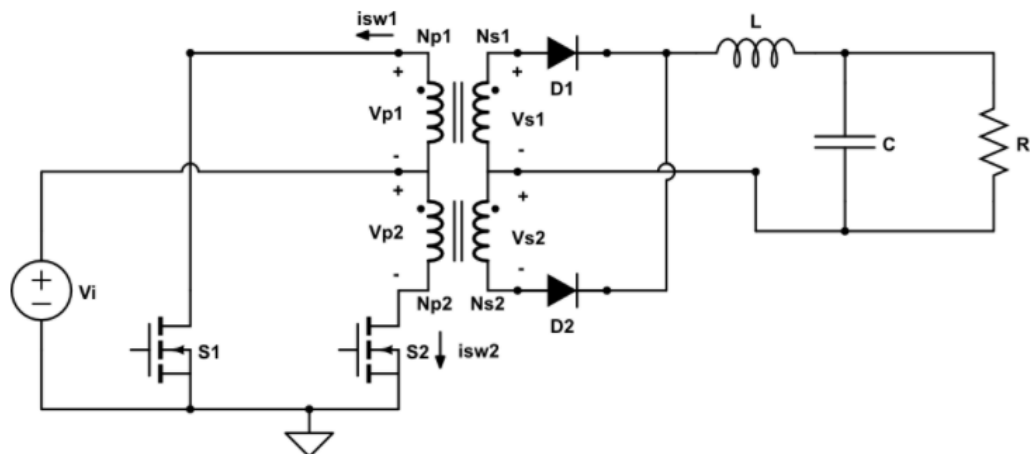


Figura 66 Inversor monofásico en push-pull esquema

TRIFÁSICOS:

- Inversor trifásico en puente:

La siguiente topología es de un inversor trifásico en puente completo, el cual se compone de 6 transistores IGBTs, cada uno con un diodo en conexión inversa, empleados para conducir la corriente reactiva de retorno a la fuente de tensión E. Estos inversores se dividen según su forma de operar en: conducción a 180° de cada elemento, con lo cual habrá 3 elementos en conducción al mismo tiempo y conducción a 120° , con 2 elementos por vez. Además, pueden alimentar los dos tipos característicos de cargas trifásicas simétricas, conexión triángulo y estrella. [28]

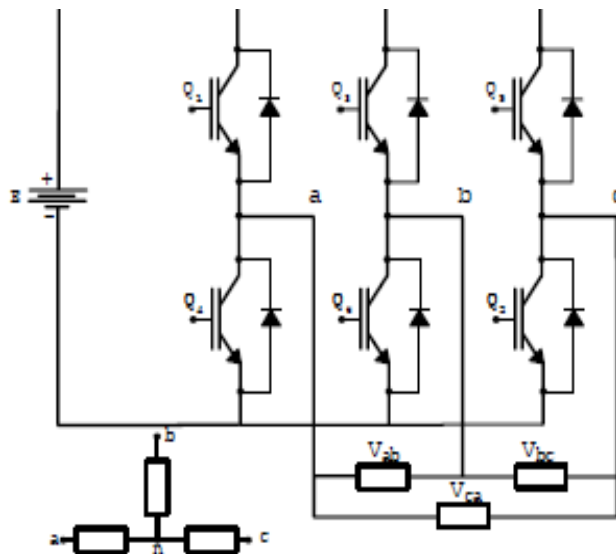


Figura 67 Inversor trifásico en puente esquema

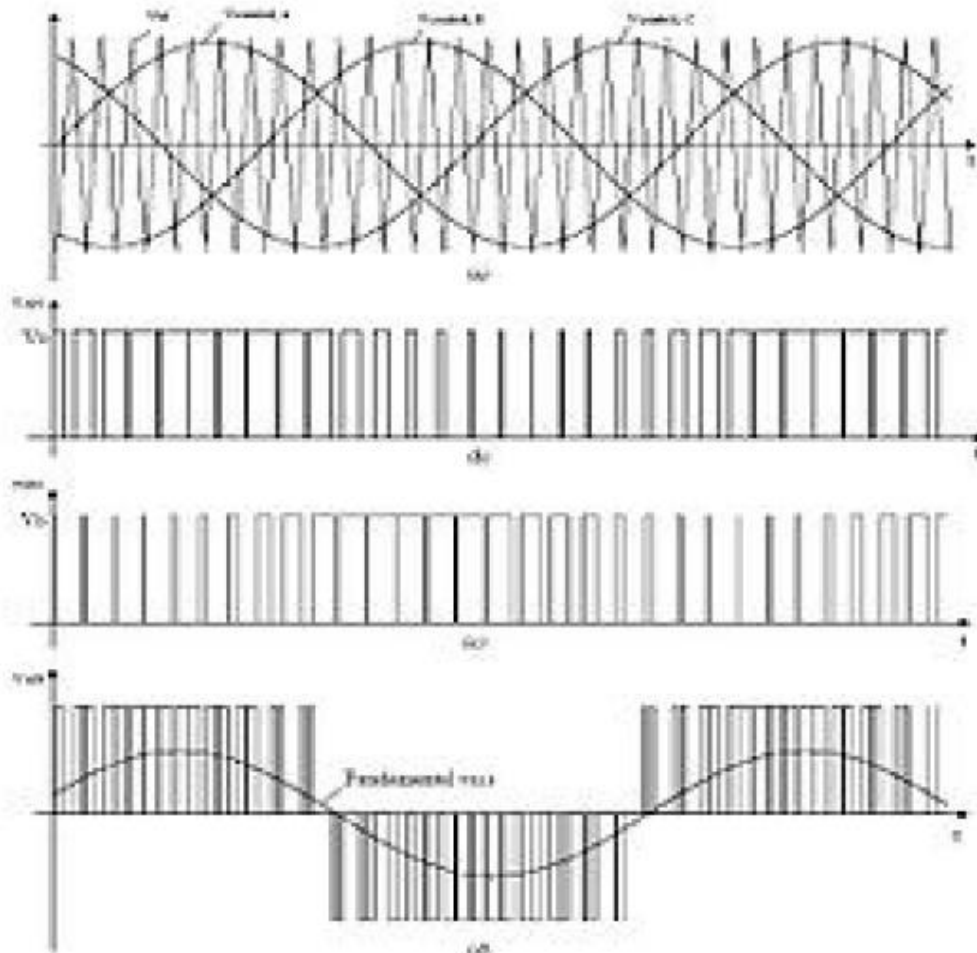


Figura 68 Inversor trifásico en puente formas de onda con control PWM

4.7.2.2.- DIMENSIONADO

IGBT's:

Calcularemos la corriente media que atraviesa los igbt's y la potencia que disipan.

Para la corriente media usaremos el cálculo de la corriente eficaz, aplicando un rendimiento del 90% y teniendo en cuenta la potencia final que se cede a las cargas conectadas al SAI, es decir, 2000VA (1200W):

$$I_{media} = \frac{P_{final}}{V * rendimiento * N^2} \quad (1)$$



Donde:

P_{final} es la potencia cedida a las cargas

V la tensión a la que se alimentan las cargas.

N° , la cantidad de semiconductores por los que circula corriente en cada semiciclo.

De modo que nos queda:

$$I_{media} = \frac{1200W}{220V * 0,9 * 2} = 3.03A.$$

Ahora, calculamos la **potencia disipada** por cada semiconductor igbt:

$$P_{disipada} = I * V \quad (2)$$

Donde:

I es la intensidad media que circula por cada semiconducotr igbt.

V la tensión que cae en cada semiconductor igbt.

De modo que nos queda:

$$P_{disipada} = 3.03 * 2V = 6.06W.$$

RADIADORES:

Se calculan los radiadores de la misma manera que en los diodos del rectificador, y se pondrá uno por cada semiconductor igbt:

Usaremos las siguientes relaciones basadas en resistencias y T^a :

$$Rth_{r-a} = Rth_{j-a} - Rth_{j-c} - Rth_{c-r} \quad (3)$$

$$T_j - T_a = Rth_{j-a} * P_{disipada} \quad (4)$$

Donde:

Rth_{r-a} la resistencia radiador ambiente.

Rth_{j-a} la resistencia unión ambiente.

Rth_{j-c} la resistencia unión caja.

$R_{th_{c-r}}$ la resistencia caja radiador.

T_j es la temperatura de la unión que será de unos 125°C (398 K).

T_a es la temperatura alrededor del equipo que será de unos 40°C (313K).

$P_{disipada}$ la potencia disipada en los igbt calculada antes.

$R_{th_{j-c}}$ y $R_{th_{c-r}}$ serán sacadas del datasheet de los igbt's:

De esta manera, de la relación 4 despejamos y sacamos

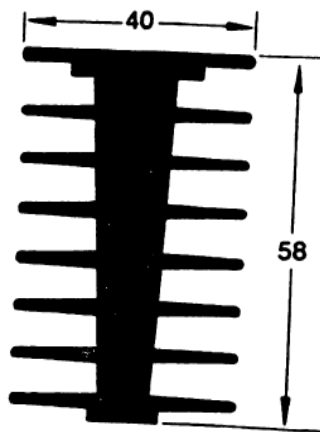
$$R_{th_{j-a}} = \frac{125-40}{6,06W} = 14 \text{ °C/W.}$$

Y pasamos todos los datos a la relación 3 donde nos queda:

$$R_{th_{r-a}} = 14 - 1,9 - 7,5 = 4,6 \text{ °C/W.}$$

Ahora, escogemos un radiador que nos sirva fijándonos en su catálogo en la curva Resistencia - Longitud para saber de qué longitud como mínimo hay que poner dicho radiador, cabe decir que se pondrá uno por cada diodo que compone el rectificador.

MODELO K-3



TIPO	LONGITUD
K3/0	1.000 mm
K3/30	30 mm.
K3/40	40 mm.
K3/50	50 mm.
K3/60	60 mm
K3/80	80 mm.

Figura 69 Datasheet radiadores

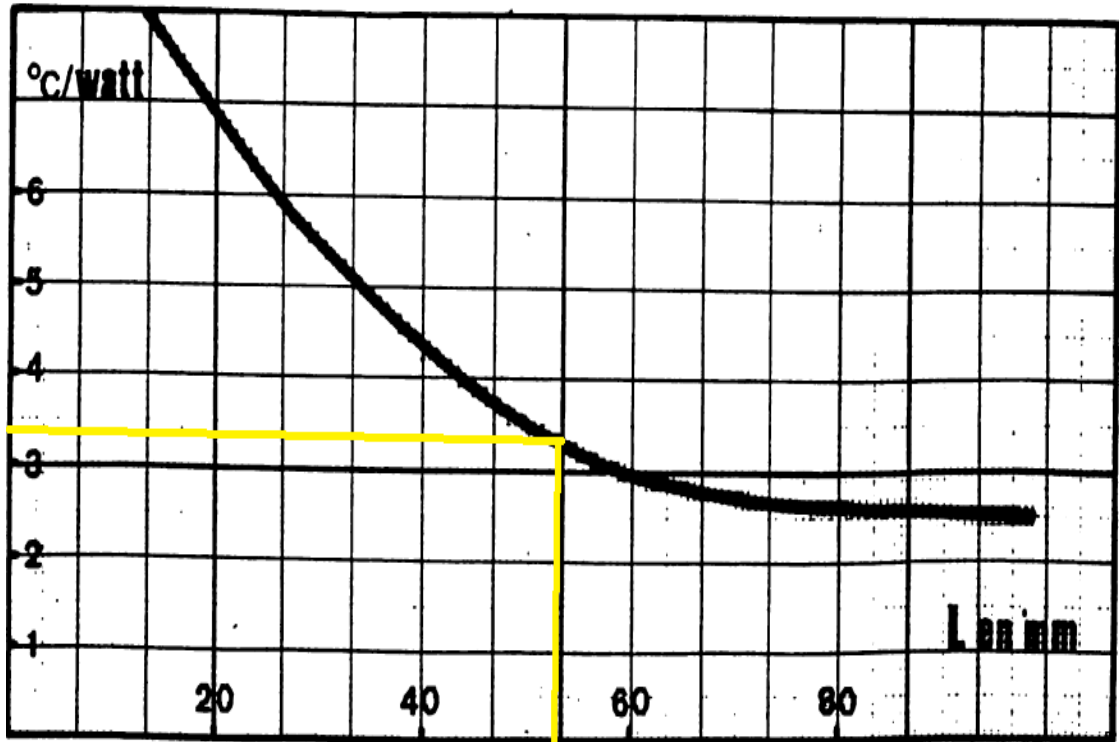


Figura 70 Datasheet radiadores

El radiador para 4,6 °C/W deberá tener una longitud de 43mm, de modo que se toma un radiador con algo más de longitud para dar un margen.

De esta manera, se ha escogido el radiador PE5-40, con una longitud de 50 mm que corresponde a una $R_{th_{r-a}}$ de 3,4°C/W.

TRANSFORMADOR DE SALIDA:

Se pondrá un transformador de salida para elevar la tensión de salida del inversor de 36V (3 baterías en serie) a 230V.

Con una relación de transformación 1:6 y una intensidad de:

$$I_{TRAFO} = \frac{P_{salida}}{V} = \frac{1200W}{36V} = 33.33A$$



4.7.2.3.- SIMULACIONES

En este caso, la tensión que sale de las baterías es de 36V DC por lo que al simular el inversor partimos de dicha tensión, para finalmente conseguir una onda de pulso cuadrada de 36 V pico que salga del inversor:

Para ello se ha usado el siguiente esquema para simular en el que he programado un bloque función de Matlab que haga que la corriente pase a través de los pulsos 1 y 2 en el semiciclo positivo y por los pulsos 3 y 4 en el semiciclo negativo activando con los pulsos las puertas de los IGBT`s de los que se compone nuestro inversor como he explicado anteriormente.

Además, dicha función calcula la frecuencia angular y hace que el ángulo de pulso varíe entre 0 y 2π , sino el ángulo iría creciendo en rampa matemáticamente.

Todo esto, la función lo hace a partir del vector de entrada u , el cual tiene dos componentes, u_1 que es la frecuencia de 50Hz a la que trabajamos y u_2 que es el tiempo que está sucediendo en simulación:

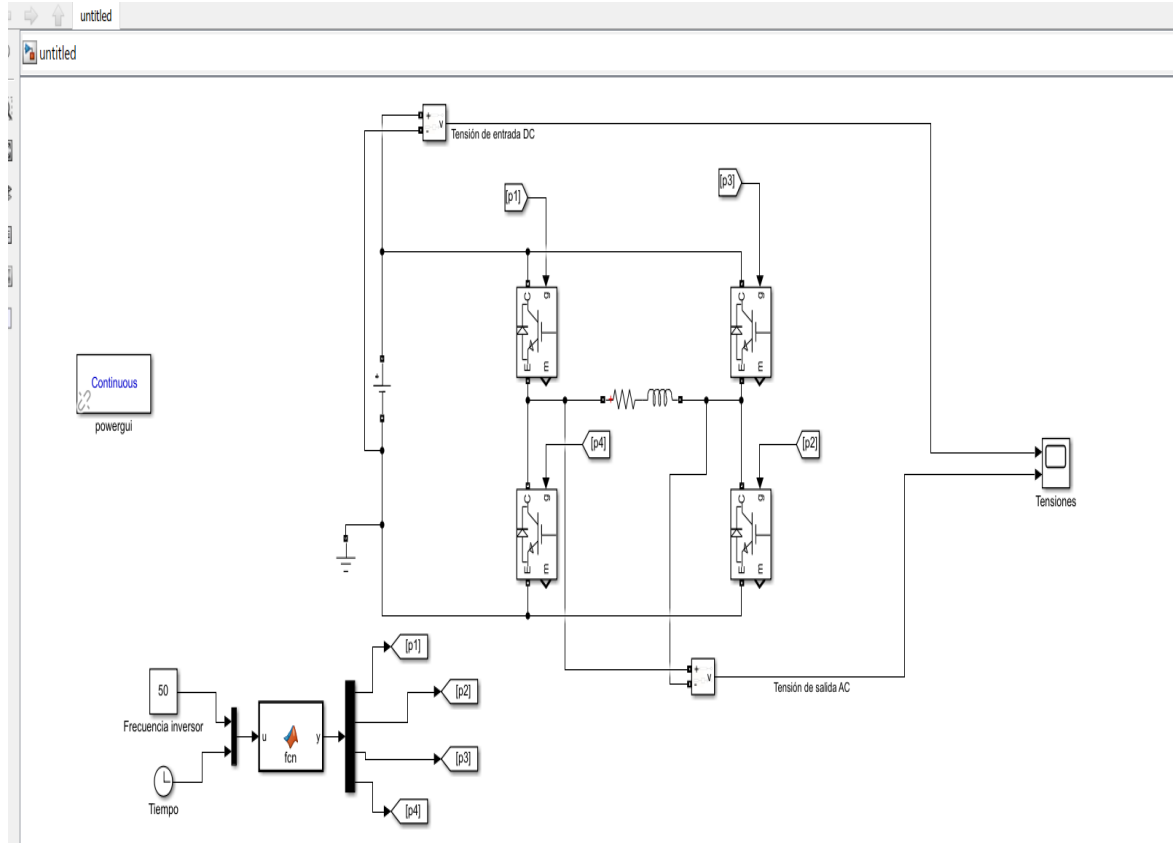


Figura 71 Esquema Inversor en puente monofásico

```
1 function y = fcn(u)
2     f=u(1);           %frecuencia
3     w=2*pi*f;        %frecuencia angular
4     t=u(2);          %Tiempo
5     angulo= w*t;     %Ángulo (rad)
6     CA=cos(angulo); %coseno angulo
7     SA=sin(angulo); %seno angulo
8
9
10    %Condiciones para que el ángulo varíe entre 0 y 2pi
11    % en vez de crecer en rampa
12    if SA>0 && CA>=0
13        ang=asind(SA);
14    elseif SA>0 && CA<=0
15        ang=180-asind(SA);
16    elseif SA<0 && CA<=0
17        ang=180-(asind(SA));
18    else
19        ang=360+(asind(SA));
20    end
21
22    %Esquema de conmutación de interruptores
23    if(ang>0 && ang<=180)
24        pulso1=1;
25        pulso2=1;
26        pulso3=0;
27        pulso4=0;
28    else
29        pulso1=0;
30        pulso2=0;
31        pulso3=1;
32        pulso4=1;
33    end
34    y=[pulso1 pulso2 pulso3 pulso4];
```

Figura 72 Función Matlab que regula los IGBT`s del inversor

Dicha simulación da lugar a las siguientes gráficas donde se compara el voltaje de entrada con el de salida comprobando el buen funcionamiento del inversor convirtiendo la señal de entrada de tensión continua en una onda cuadrada de tensión de las mismas magnitudes.

Cabe decir que en el siguiente apartado se incorporará un método de control PWM al inversor de la simulación.

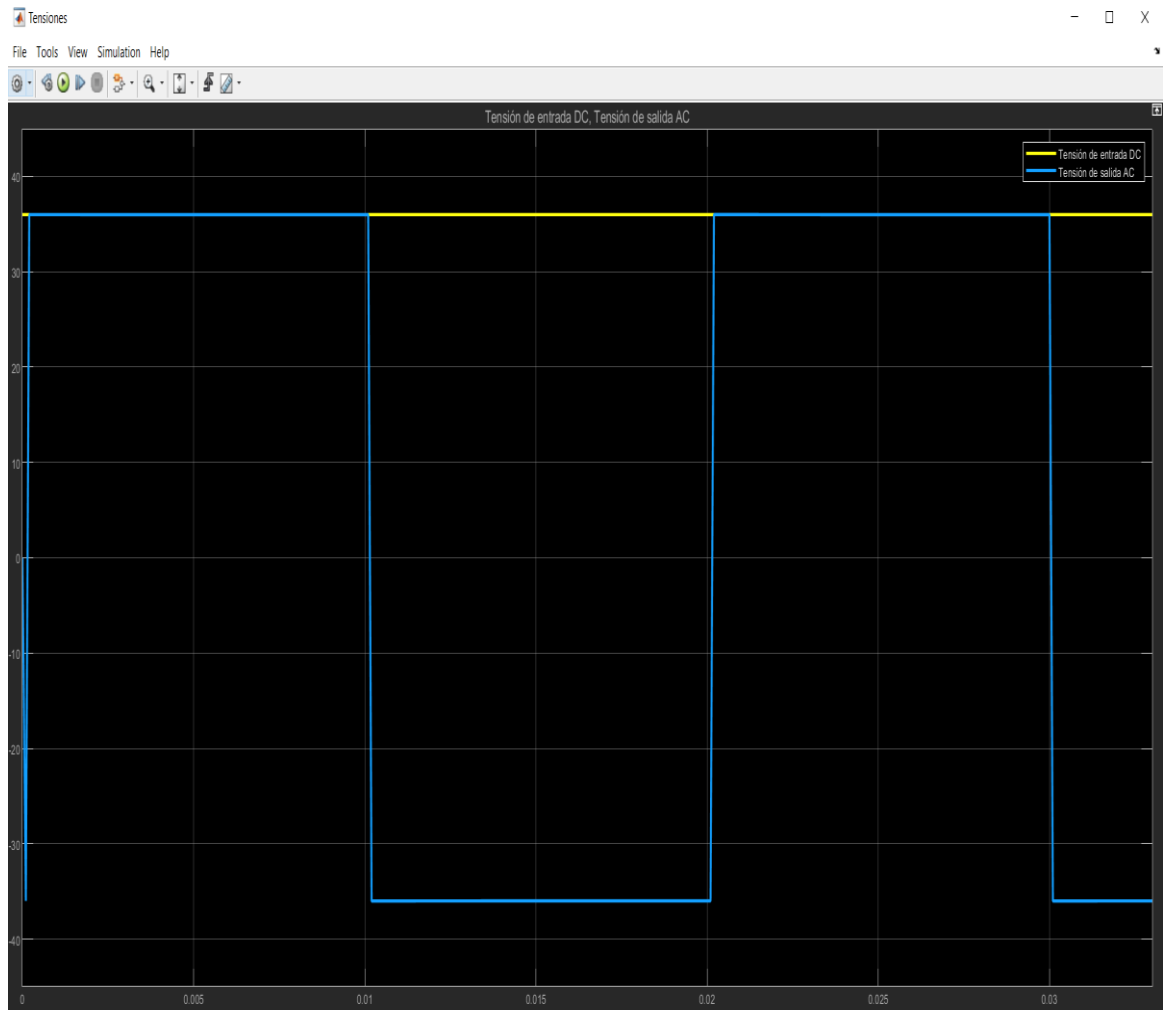


Figura 73 Comparación tensiones de entrada y salida en el inversor

4.7.3.- Método de control de ancho de pulso PWM

La modulación de ancho de pulso está formada por una señal de onda cuadrada que no siempre tiene la misma relación entre el tiempo que está en alto y el tiempo que está en bajo.

En la siguiente imagen vemos una señal que varía entre 5 voltios y 0 voltios. A lo largo del tiempo la señal varía entre dos valores de tensión. Durante un tiempo determinado la señal se encuentra en el nivel alto (en este caso 5v) y durante otro periodo de tiempo se encuentra en el segundo valor de tensión (en este caso 0v).

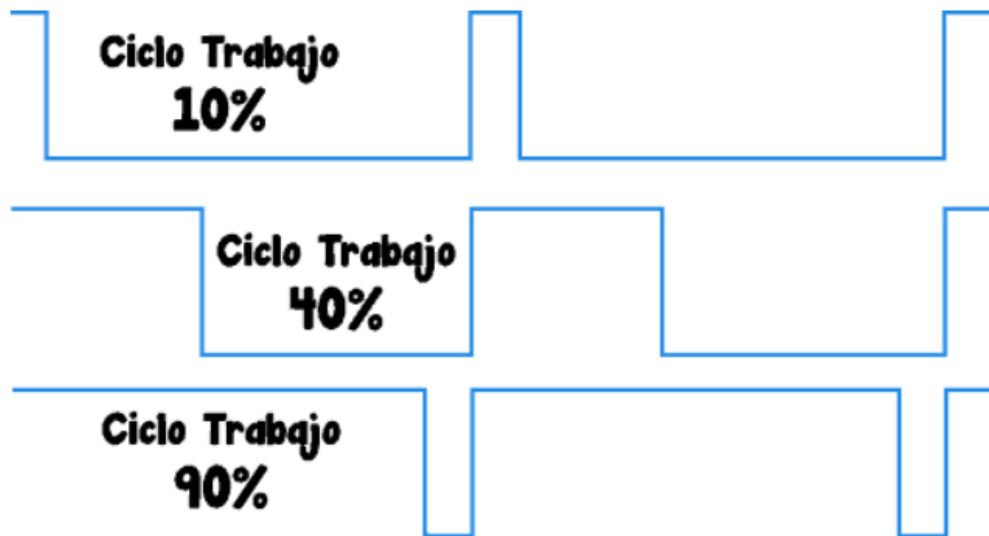


Figura 74 Señales PWM

El tiempo que la señal se encuentra en el nivel alto (5 voltios) lo denominamos tiempo on (Ton) mientras que el tiempo que está en nivel bajo lo denominamos tiempo off (Tofe). La suma del tiempo on y el tiempo off es el periodo de la señal (T).

Y como en toda señal periódica, el inverso de del periodo ($1 / T$) es la frecuencia de la señal.

Funciona variando su valor de tensión entre dos valores conocidos, por ejemplo, Vcc y GND en periodos concretos de tiempo y con una frecuencia fija. Estos periodos reciben nombres especiales.

La variación de ancho de pulso consiste en variar los tiempos de encendido y apagado, es decir Ton y Toff. Al cambiar el valor de un PWM, en realidad se están modificando estos tiempos.

Una de las características más importantes de una señal PWM es su ciclo de trabajo ya que este es el que varía en un PWM.

El ciclo de trabajo no es la relación entre el tiempo de encendido y el periodo o tiempo total del PWM. ($DC=Ton/T$).

Cuanto mayor sea el duty cycle, mayor tiempo estará la señal de tensión en alto, sin variar el periodo. Por consecuencia, como el periodo no vario y la suma de Ton y Toff, si el tiempo de encendido aumenta, el tiempo de apagado disminuye.

Al variar el ciclo de trabajo de una señal PWM, lo que estamos haciendo es variar su tensión media y esta es la clave por la cual usamos el PWM. Cuando una señal media de tensión atraviesa componentes electrónicos, puede hacer que su comportamiento cambie, en nuestro caso activando y desactivando IGBT's para que circule o no corriente a través de ellos.

Para generar la señal de ancho de pulso se puede usar un microcontrolador, en el caso de que no exista una librería disponible, se puede crear usando un temporizador del microcontrolador.

Otra alternativa puedes ser usar el clásico Arduino para generar la señal de modulación de ancho de pulso. En Arduino la señal de PWM la generamos mediante el uso del método analogWrite(). [30]

SIMULACIÓN DEL INVERSOR CON CONTROL PWM Y FILTRADO DE CORRIENTE:

Se incorpora a la simulación el control PWM con un bloque de simulación PWM acorde a nuestro esquema monofásico de 50 Hz con una señal senoidal de referencia y una rampa que simula el ángulo de fase además del filtrado de corriente RLC.

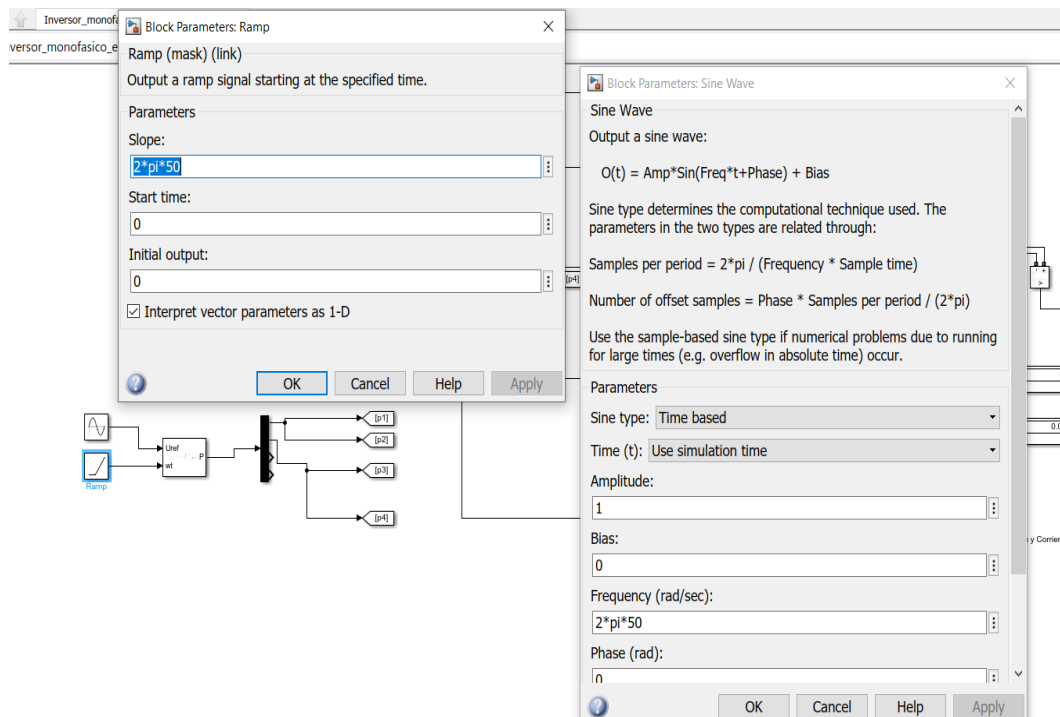


Figura 75 Bloque PWM con referencias

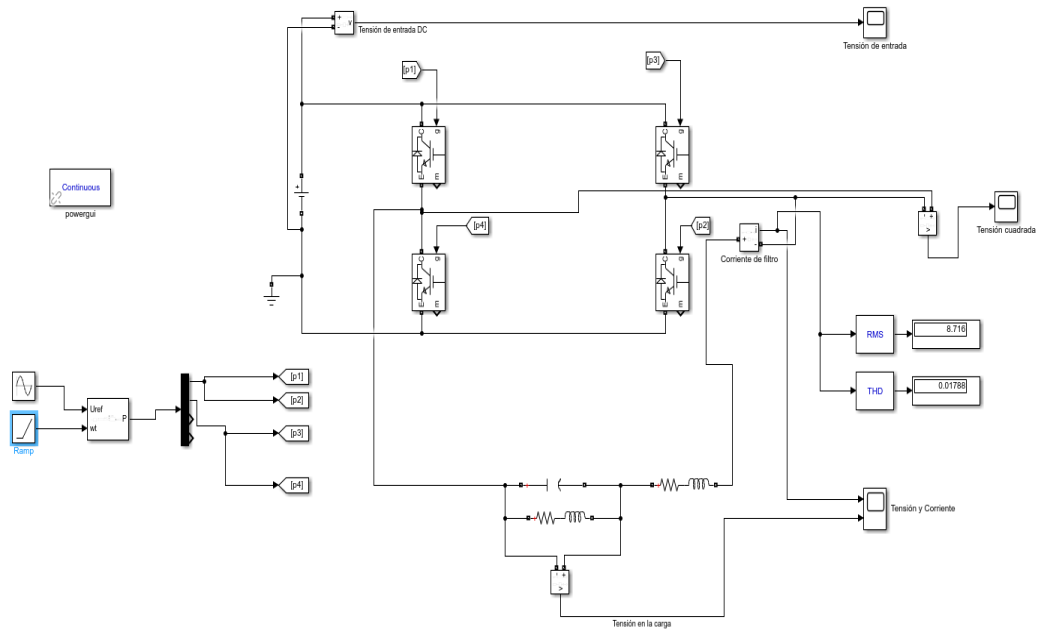


Figura 76 esquema de simulación completo de inversor con PWM

Primero simulamos con una relación de frecuencias entre la onda portadora y la moduladora de 9:

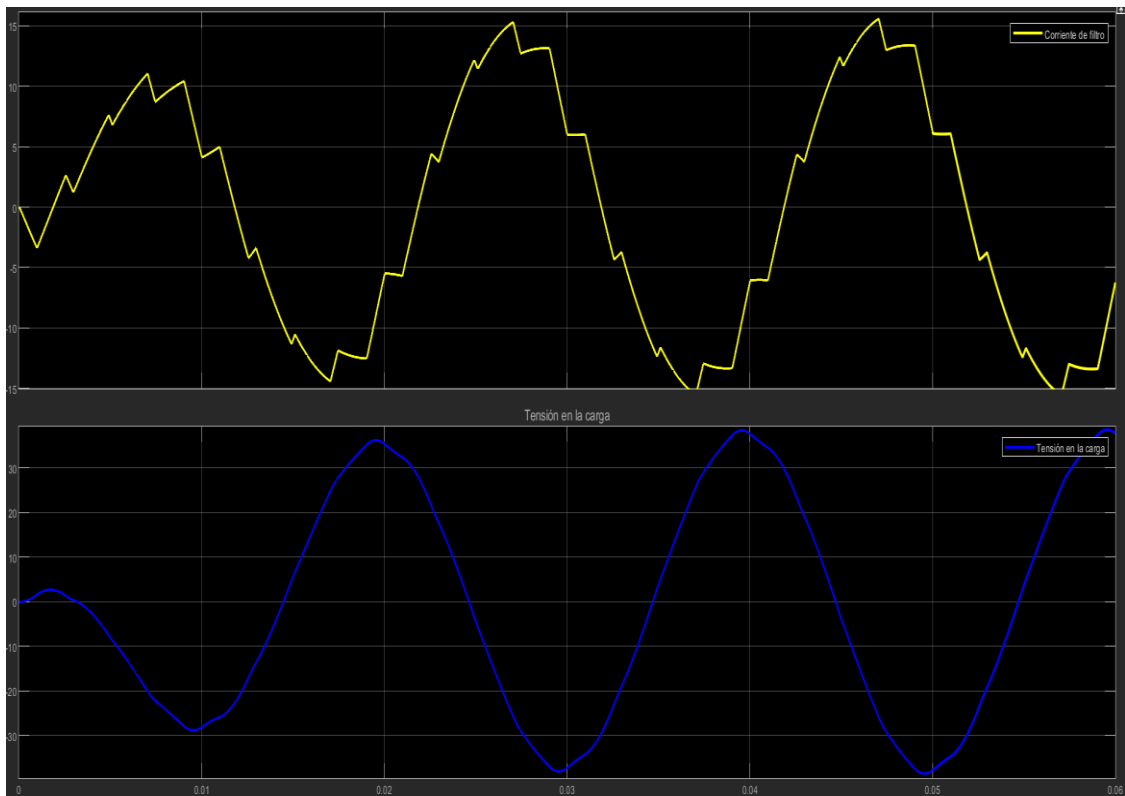


Figura 77 Tensión de la carga y Corriente de filtro del inversor con PWM

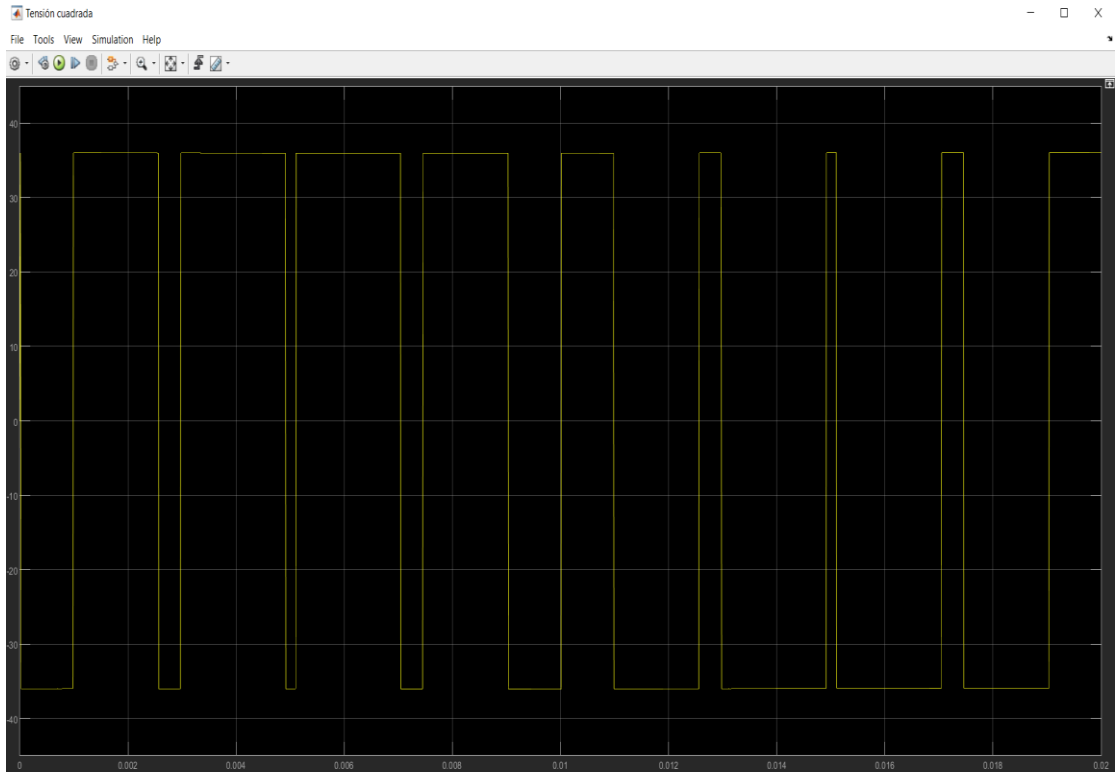


Figura 78 Tensión de PWM

Ahora, simularemos con una relación de frecuencias entre la onda portadora y la moduladora de 39, de esta manera, el filtro será más eficaz y la corriente saldrá con menos ruido y aún más senoidal y la onda cuadrada del PWM tendrá más pulsos por ciclo:

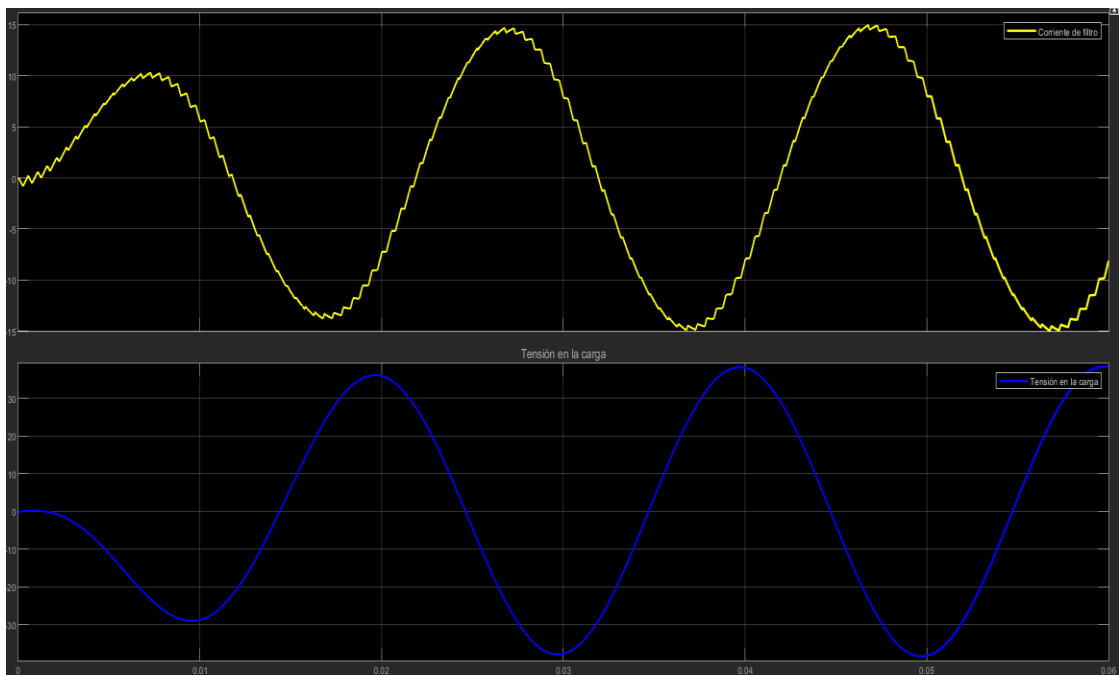


Figura 79 Tensión de la carga y Corriente de filtro del inversor con PWM

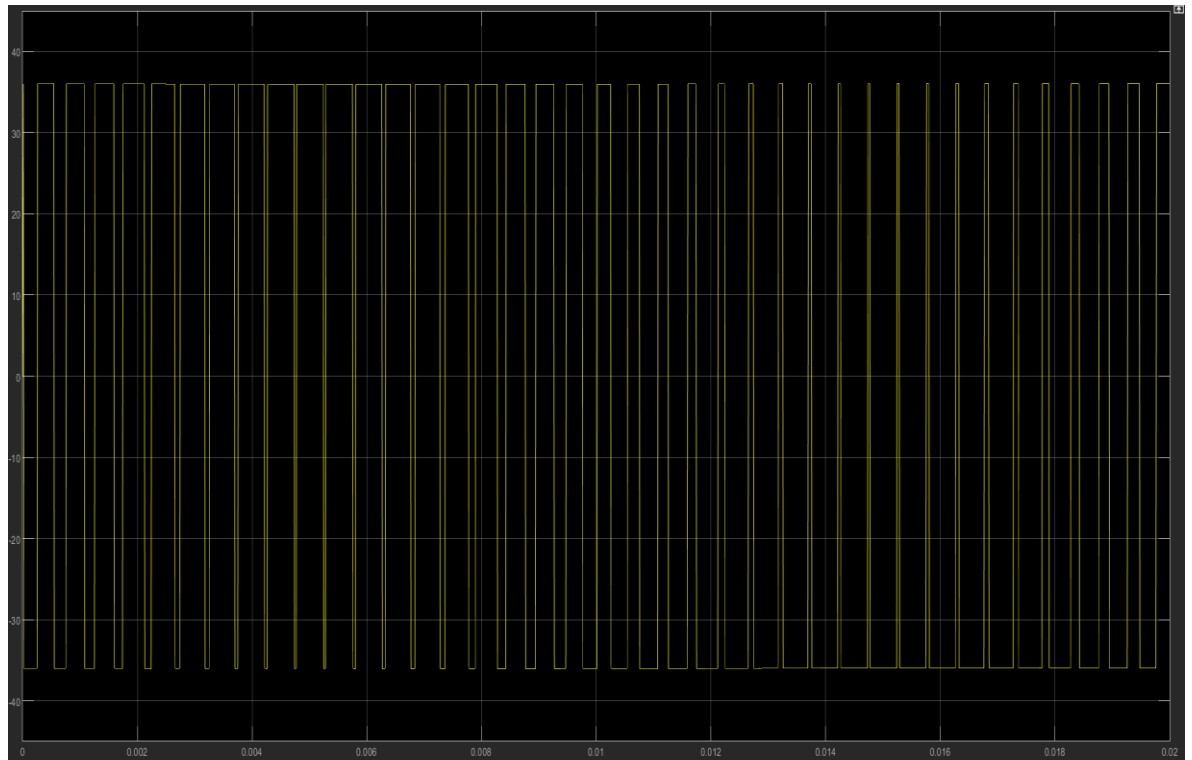


Figura 80 Tensión de PWM

Ahora ya comprobamos como efectivamente el inversor cumple su función coordinada con el método de control PWM y un filtrado de corriente eficaz, asumiendo unos valores correctos para alimentar las cargas.

4.7.4.- Baterías

Se pondrán baterías de plomo-ácido sencillas por lo que no es necesario un cargador de baterías.

El número de baterías de 12 V y 9Ah será de 3 en serie y está sacado del apartado de autonomía del SAI donde se demuestra que serán necesarias esas 3 baterías.

4.7.5.- Bypass

El Bypass es principalmente un interruptor que permite que en funcionamiento normal la red eléctrica proporcione la alimentación a la carga mientras que, si se producen faltas en la red eléctrica o si la red eléctrica presenta una calidad



o características inferiores a las requeridas, el interruptor conmuta para permitir alimentar a la carga a través de la batería interna incorporada en el SAI.

Primero, se realiza la sincronización de la tensión de red con la base de datos almacenada en una memoria dentro de la placa de evaluación del microprocesador.

Dependiendo de la calidad buscada y de la precisión se elegirá una determinada frecuencia para comprobar el estado de la red eléctrica.

La idea básica sería tener las muestras almacenadas en una memoria Flash y que en la primera puesta en marcha del SAI y por tanto del microprocesador se cargaran a la memoria interna del mismo para poder gestionar los datos con mayor velocidad.

Una vez realizado el sincronismo, lo único que tenemos que hacer es ir tomando una muestra cada periodo de tiempo escogido y compararla con la de referencia de la tabla, pero multiplicada por unos factores de calidad.

Con esto, ya tendremos lo necesario para construir el bypass. [29]

4.7.6.- Filtro de salida

Será necesario filtrar todo tipo de perturbaciones a la salida del SAI pues las cargas conectadas pueden sufrir daños severos.

Las corrientes armónicas generan una gran cantidad de perturbaciones con consecuencias perjudiciales: envejecimiento prematuro y destrucción de equipos, sobredimensionamiento de las instalaciones, disparos de las protecciones lo cual acarrea pérdidas de dinero, en cualquier caso.

En los sistemas de comunicaciones se emplean filtros para dejar pasar solo las frecuencias que contengan la información deseada y eliminar las restantes.

Los filtros son usados para dejar pasar solamente las frecuencias que pudieran resultar ser de alguna utilidad y eliminar cualquier tipo de interferencia o ruido ajeno a ellas.

Existen dos tipos de filtros:

Filtros Pasivos: son aquellos tipos de filtros formados por combinaciones serie o paralelo de elementos R, L o C.

Los filtros activos son aquellos que emplean dispositivos activos, por ejemplo, los transistores o los amplificadores operacionales, junto con elementos R L C.

En general se tienen los filtros de los siguientes tipos:

Paso alto

Paso bajo

Paso banda

Para cada uno de estos filtros existen dos zonas principales las cuales son llamadas Banda de paso y la banda de atenuación.

En la banda de paso, es donde las frecuencias pasan con un máximo de su valor, o hasta un valor de 70.71% con respecto a su original (la cual es la atenuación de -30 dB). [29]

Filtro paso bajo:

Es el primer filtro que se tiene, su funcionamiento es a base de un condensador y resistencia, este filtro tiene la siguiente configuración:

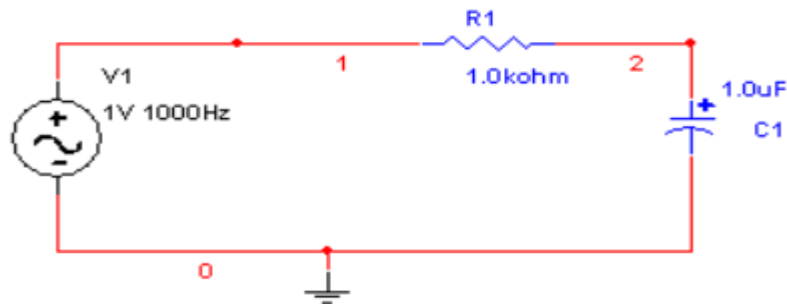


Figura 81 Esquema filtro paso bajo

El condensador se comporta como una resistencia dependiente de la frecuencia por la relación de:

$$X_c = \frac{1}{C(2\pi)f}$$

Es decir, para frecuencias muy bajas el condensador (por la regla de división de voltaje) al ser una resistencia muy alta, consume todo el voltaje, si se conecta la salida en paralelo al condensador se tendrá el máximo de voltaje a la salida.

Conforme aumentemos la frecuencia de la fuente el condensador disminuye su impedancia, con lo que el voltaje que disipa disminuye, hasta tender a cero. [29]

Este tipo de filtro tiene una gráfica de respuesta en frecuencia:

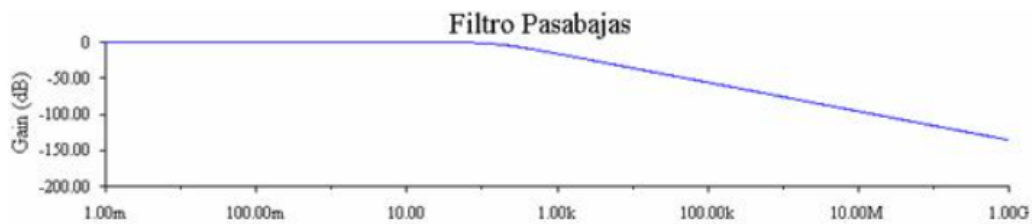


Figura 82 Gráfica filtro paso bajo

La magnitud y la frecuencia de corte quedan expresadas como:

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \quad f_c = \frac{1}{RC 2\pi}$$

Filtro Paso-alto:

Este es el segundo de los filtros pasivo, el único cambio que presenta es la conexión de la salida, la cual en vez de tomarse del condensador se toma de la resistencia lo cual nos provoca que en vez de dejar “pasar” las frecuencias bajas pasen las frecuencias altas.

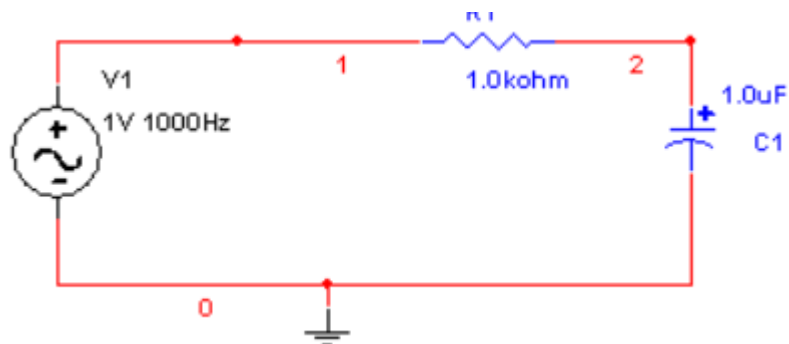


Figura 83 Esquema filtro pasa altas

Como ya se ha dicho, el circuito físicamente es igual que el anterior, solamente la salida se toma de la resistencia.

Explicación, cuando la frecuencia es demasiado baja, el voltaje se consume casi en su totalidad en el condensador, el cual se comporta como una impedancia de valor muy alto, por lo que en la salida no se tiene casi voltaje, cuando la frecuencia aplicada es aumentada se tiene que el valor de la impedancia representada por el condensador disminuye hasta que casi no consume voltaje, y la mayoría del voltaje se tiene a la salida.

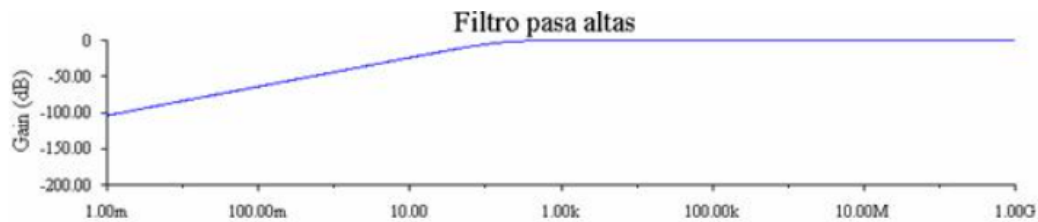


Figura 84 Gráfica filtro paso alto

Estos dos filtros tienen un valor llamado frecuencia de corte, la cual es el valor de la frecuencia a partir del cual se considera que ya está filtrando las señales.

Esta frecuencia está determinada como la frecuencia en la que el valor de la salida con respecto a la entrada tiene una atenuación de -3dB. (o la salida es .717 del valor de la entrada).

Dependiendo de los valores elegidos de resistencia y capacitancia será el valor de la frecuencia de corte.

Pero, para una resistencia fija, el valor de la frecuencia de corte depende del valor del condensador. [29]

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$$

$$f_c = \frac{1}{RC 2\pi}$$

Filtro paso banda:

Este es un filtro que se compone de un filtro pasa bajas y uno pasa altas conectados en cascada.

Los componentes se deben de seleccionar para que la frecuencia de corte del filtro pasaaltas sea menor que la del filtro pasabajas.

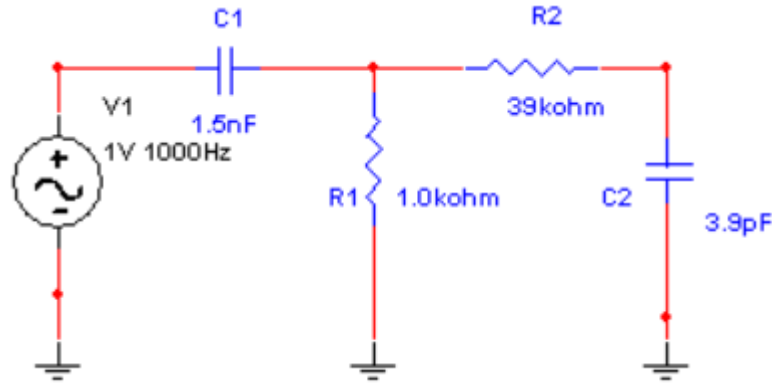


Figura 85 Esquema filtro paso banda

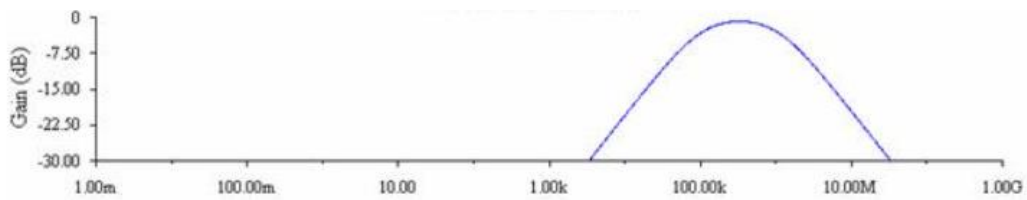


Figura 86 Gráfica filtro paso banda

Las frecuencias de corte se pueden calcular con las fórmulas anteriores.

La característica más importante de este circuito es el ancho de banda que permitiremos pasar, el ancho de banda es igual a la resta de las frecuencias de corte. [29]

En este caso, usaremos un filtro tipo “pi”, es un filtro CLC el cual se puede aproximar a un tipo de filtro Butterworth de tercer orden, pues por tener tres elementos pasivos presenta tres polos. La función de transferencia que sigue este tipo de filtros será:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \frac{\omega^{2N}}{\omega_c^{2N}}}$$

Donde N se corresponde con el orden del filtro, en nuestro caso 3.

Para determinar la frecuencia de corte del filtro de salida del inversor, aplicaremos la fórmula de la función de transferencia para el filtro de orden 3 para la tercera componente armónica.



5.-CONCLUSIONES

El objeto de este estudio ha sido realizar un Sistema de Alimentación Ininterrumpida que nos pueda ofrecer energía eléctrica en momentos en los que la red nacional caiga, además de filtrar cualquier tipo de perturbación que haga que las cargas conectadas disminuyan su vida útil y haya pérdidas de potencia mayores.

De esta manera, se decidió realizar un SAI en topología ON-LINE de manera que si por algún casual el SAI falla, las cargas tomen directamente energía de la red y nunca tengan falta de electricidad.

Más tarde, se fueron diseñando y explicando en detalle todos los elementos que constituyen el sistema, así como sus cálculos necesarios para proporcionar la potencia requerida de 2000VA a las cargas conectadas.

Como posibles mejoras en este proyecto estaría la implementación de control digital empleando por ejemplo microprocesadores para el disparo de los polos de potencia, lo que proporcionaría una gran flexibilidad pues modificando el programa se podrían realizar cambios sin tener que modificar el hardware. Otra posible mejora podría ser la incorporación de baterías externas al SAI para conseguir mayor autonomía y la gestión de estas.





6.-BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hiper Shops (9 de marzo de 2016). *¿Qué es un SAI? Tipos de SAI*. [Entrada de Blog]. Recuperado de <https://todosai.com/blog/que-es-un-sai-tipos-de-sai-b31.html> (Consultado 15/02/2021)
- [2] Seymour, J. (2010). *Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*. [Archivo PDF]. Recuperado de https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=SPD_VAVR-5WKLPK_LS (Consultado 16/02/2021)
- [3] Grumar Trading (abril de 2017). *Tipos de SAIS: ¿Qué SAI necesito?* [Entrada de Blog]. Recuperado de <https://grumartrading.com/2017/04/tipos-de-sais-que-sai-necesito/> (Consultado 18/02/2021)
- [4] DNS-SYSTEM (s.f.). *Que es un SAI y diferencias entre On-Line, interactivo y off-Line*. Recuperado de https://www.dns-system.es/que_es_un_sai.php (Consultado 18/02/2021)
- [5] Da Silva, K. (24 de junio de 2019). *¿Cómo funcionan los rectificadores?* [Artículo]. Recuperado de https://techlandia.com/funcionan-rectificadores-como_10736/ (Consultado 19/02/2021)
- [6] Areatecnologia (s.f.). *Rectificador de media onda*. Recuperado de <https://www.areatecnologia.com/electronica/rectificador-de-media-onda.html> (Consultado 19/02/2021)
- [7] Pérez, A. (2016). *Rectificadores*. [Archivo PDF]. Recuperado de http://profesores.elo.utfsm.cl/~mpl/wp-content/uploads/2016/08/elo381_capitulo_03_rectificadores.pdf (Consultado 22/02/2021)
- [8] Schneider Electric (s.f.). *BYPASs LTM9BPS*. [Producto de tienda online]. Recuperado de <https://www.se.com/es/es/product/LTM9BPS/bypass/> (Consultado 23/02/2021)
- [9] Bortignon, S. (2021). *Cómo funciona un inversor: esquema y funcionamiento*. MPPTSOLAR. Recuperado de <https://www.mpptsolar.com/es/esquema-funcionamiento-inversor.html> (Consultado 23/02/2021)
- [10] Autosolar (s.f.). *Inversores de onda senoidal pura*. Recuperado de <https://autosolar.es/inversores/inversores-onda-senoidal->



[pura#:~:text=Los%20inversores%20de%20onda%20senoidal,mucho%20ma%C3%A1s%20bruscos%20y%20segmentados](#) (Consultado 25/02/2021)

[11] Ingeniería mecafenix (29 de mayo de 2019). *¿Qué es una batería y cómo funciona?* Recuperado de <https://www.ingmecafenix.com/electronica/que-es-una-bateria/> (Consultado 26/02/2021)

[12] Dechaves, P. (2019). *Teoría sobre baterías*. [Entrada de blog]. Recuperado de <https://dechavesmotion.com/teoria-sobre-baterias-1/> (Consultado 26/02/2021)

[13] Corriente alterna (s.f.). *Potencia en un circuito de corriente alterna*. Recuperado de http://www.proyecto987.es/corriente_alterna_11.html (Consultado 02/03/2021)

[14] Electrónica industrial (s.f.). *El SCR*. [Entrada de blog] Recuperado de <https://electronicaindustrialweb.wordpress.com/el-scr/> (Consultado 04/03/2021)

[15] Marin, J. (7 de junio de 2017). *Tiristor desactivado por compuerta (GTO)*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/JorgeMarin97/tiristor-desactivado-por-compuerta-gto-76716260> (Consultado 09/03/2021)

[16] Tema 7. *Tiristores de apagado por puerta*. (s.f.). [Archivo PDF]. Recuperado de https://woody.us.es/~leopoldo/Store/tsp_7.pdf (Consultado 09/03/2021)

[17] Manso, F. [Electrónica FP]. (25 de mayo de 2016). *T#1 Transistores bipolares 1, introducción*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=dIV5I9cx_ck (Consultado 10/03/2021)

[18] Manso, F. [Electrónica FP]. (26 de mayo de 2016). *T#2 Transistores bipolares 2 -zonas*. [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=7Q79fhvoRSs> (Consultado 10/03/2021)

[19] Areatecnología (s.f.). *MOSFET*. Recuperado de <https://www.areatecnologia.com/electronica/mosfet.html> (Consultado 12/03/2021)

[20] Taller Electrónica (s.f.). *Transistor IGBT*. [Entrada de blog]. Recuperado de <https://tallerelectronica.com/transistor-igbt/> (Consultado 16/03/2021)

[21] EcuRed (s.f.). *Transistor IGBT*. Recuperado de https://www.ecured.cu/Transistor_IGBT (Consultado 16/03/2021)



- [22] Electrónica industrial, sección EL. [Entrada de blog]. Recuperado de <https://electronicaindustrialweb.wordpress.com/el-scr/> (Consultado 17/04/2021)
- [23] Catedu Centro Aragonés de tecnologías para la educación http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3079/html/42_rectificadores_monofasicos.html (Consultado 17/04/2021)
- [24] MPPT Solar, empresa de energías renovables, página web <https://www.mpptsolar.com/es/esquema-funcionamiento-inversor.html> (Consultado 28/04/2021)
- [25] Área tecnología, página web <https://www.areatecnologia.com/electronica/triac.html> (Consultado 28/04/2021)
- [26] Electrónica de Potencia. Daniel W. Hart. UV.es https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/inversores_modulados.pdf (Consultado 28/04/2021)
- [27] Electrónica. Rubén Sánchez. Página web <http://rubensm.com/convertidor-push-pull/> (Consultado 28/04/2021)
- [28] Scientia et Technica Año XIV, No 40, Diciembre de 2008. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4733118.pdf> (Consultado 28/04/2021)
- [29] Electrónica fácil. Página web. <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/Filtros-pasivos.html> (Consultado 03/05/2021)
- [30] Web Rincón ingenieril Enrique Gómez, 2010. <https://www.rinconingenieril.es/que-es-pwm-y-para-que-sirve/> (Consultado 12/05/2021)





7.-ANEXOS

HOJA DE INSPECCIÓN DE LOS DIODOS USADOS EN RECTIFICADOR:



www.vishay.com

VS-40HF(R) Series

Vishay Semiconductors

Standard Recovery Diodes, (Stud Version), 40 A



DO-203AB (DO-5)

FEATURES

- High surge current capability
- Stud cathode and stud anode version
- Leaded version available
- Types up to 1600 V V_{RRM}
- Designed and qualified for multiple level
- Material categorization: For definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



TYPICAL APPLICATIONS

- Battery charges
- Converters
- Power supplies
- Machine tool controls
- Welding

PRODUCT SUMMARY	
$I_{F(AV)}$	40 A
Package	DO-203AB (DO-5)
Circuit configuration	Single diode

MAJOR RATINGS AND CHARACTERISTICS				
PARAMETER	TEST CONDITIONS	40HF(R)		UNITS
		10 TO 120	140/160	
$I_{F(AV)}$	T_C	40	40	A
		140	110	$^{\circ}C$
$I_{F(RMS)}$		62	62	A
I_{FSM}	50 Hz	570	570	A
	60 Hz	595	595	
P_t	50 Hz	1600	1600	A^2s
	60 Hz	1450	1450	
V_{RRM}	Range	100 to 1200	1400 to 1600	V
T_J		-65 to 190	-65 to 160	$^{\circ}C$

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

VOLTAGE RATINGS				
TYPE NUMBER	VOLTAGE CODE	V_{RRM} , MAXIMUM REPETITIVE PEAK REVERSE VOLTAGE V	V_{RSM} , MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK REVERSE VOLTAGE V	I_{BRM} MAXIMUM AT $T_J = T_J$ MAXIMUM mA
VS-40HF(R)	10	100	200	9
	20	200	300	
	40	400	500	
	60	600	700	
	80	800	900	
	100	1000	1100	
	120	1200	1300	
	140	1400	1500	
	160	1600	1700	4.5

Revision: 29-Jan-14

1

Document Number: 93513

For technical questions within your region: DiodesAmericas@vishay.com, DiodesAsia@vishay.com, DiodesEurope@vishay.com
THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000



www.vishay.com

VS-40HF(R) Series

Vishay Semiconductors

FORWARD CONDUCTION						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		40HF(R)		UNITS
				10 TO 120	140/160	
Maximum average forward current at case temperature	$I_{F(AV)}$	180° conduction, half sine wave		40	40	A
Maximum RMS forward current	$I_{F(RMS)}$			140	110	°C
Maximum peak, one-cycle forward, non-repetitive surge current	I_{FSM}	t = 10 ms t = 8.3 ms	No voltage reappplied	62		A
Maximum I^2t for fusing	I^2t	t = 10 ms	No voltage reappplied	570		A
		t = 8.3 ms	100 % V_{RRM} reappplied	595		
		t = 10 ms	Sinusoidal half wave, initial $T_J = T_J$ maximum	480		
		t = 8.3 ms		500		
Maximum $I^2\sqrt{t}$ for fusing	$I^2\sqrt{t}$	t = 0.1 ms to 10 ms, no voltage reappplied		1600		A ² s
Value of threshold voltage (up to 1200 V)	$V_{F(TO)}$	$T_J = T_J$ maximum		1450		V
Value of threshold voltage (for 1400 V/1600 V)	$V_{F(TO)}$			1150		
Value of forward slope resistance (up to 1200 V)	r_f	$T_J = T_J$ maximum		1060		mΩ
Value of forward slope resistance (for 1400 V/1600 V)	r_f			3.8		
Maximum forward voltage drop	V_{FM}	$I_{pk} = 125$ A, $T_J = 25$ °C, $t_p = 400$ μs rectangular wave		1.30	1.50	V

THERMAL AND MECHANICAL SPECIFICATIONS						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		40HF(R)		UNITS
				10 TO 120	140 TO 160	
Maximum junction operating and storage temperature range	T_J, T_{Stg}			-65 to 190	-65 to 160	°C
Maximum thermal resistance, junction to case	R_{thJC}	DC operation		0.95		KW
Maximum thermal resistance, case to heatsink	R_{thCS}	Mounting surface, smooth, flat and greased		0.25		
Maximum allowable mounting torque (+0 %, -10 %)		Not lubricated thread, tightening on nut ⁽¹⁾		3.4 (30)		N · m (lb ² · in)
		Lubricated thread, tightening on nut ⁽¹⁾		2.3 (20)		
		Not lubricated thread, tightening on hexagon ⁽²⁾		4.2 (37)		
		Lubricated thread, tightening on hexagon ⁽²⁾		3.2 (28)		
Approximate weight				17		g
Case style		See dimensions - link at the end of datasheet		0.6		oz.
				DC-203AB (DO-5)		

Notes

- ⁽¹⁾ Recommended for pass-through holes
- ⁽²⁾ Recommended for holed threaded heatsinks

ΔR_{thJC} CONDUCTION				
CONDUCTION ANGLE	SINUSOIDAL CONDUCTION	RECTANGULAR CONDUCTION	TEST CONDITIONS	UNITS
180°	0.14	0.10	$T_J = T_J$ maximum	KW
120°	0.16	0.17		
90°	0.21	0.22		
60°	0.30	0.31		
30°	0.50	0.50		

Note

- The table above shows the increment of thermal resistance R_{thJC} when devices operate at different conduction angles than DC

Revision: 29-Jan-14

2

Document Number: 93513

For technical questions within your region: DiodesAmericas@vishay.com, DiodesAsia@vishay.com, DiodesEurope@vishay.com
THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS. SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000



www.vishay.com

VS-40HF(R) Series Vishay Semiconductors

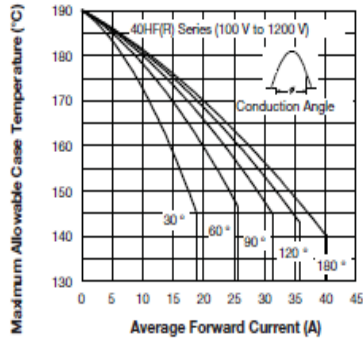


Fig. 1 - Current Ratings Characteristics

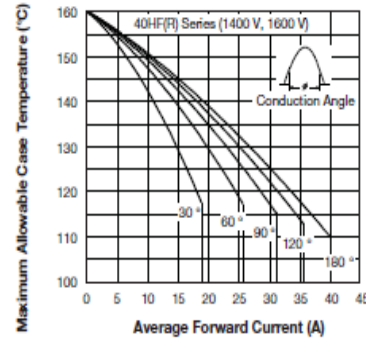


Fig. 3 - Current Ratings Characteristics

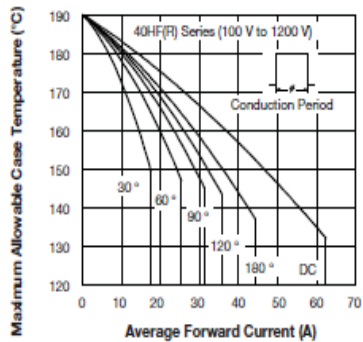


Fig. 2 - Current Ratings Characteristics

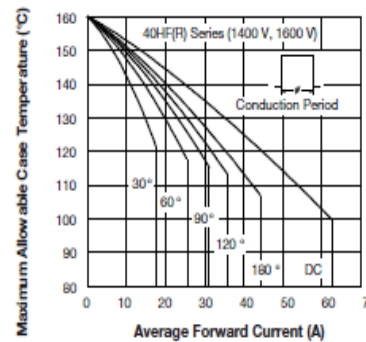


Fig. 4 - Current Ratings Characteristics

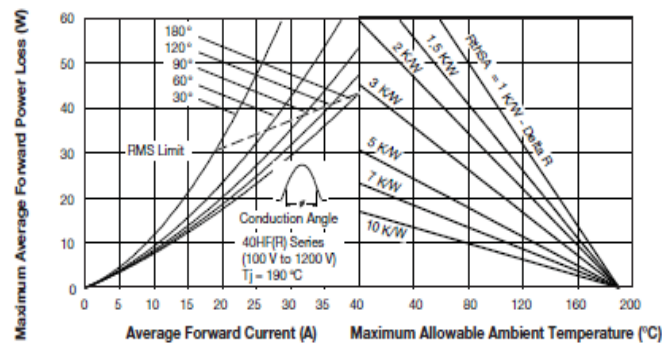


Fig. 5 - Forward Power Loss Characteristics



www.vishay.com

VS-40HF(R) Series

Vishay Semiconductors

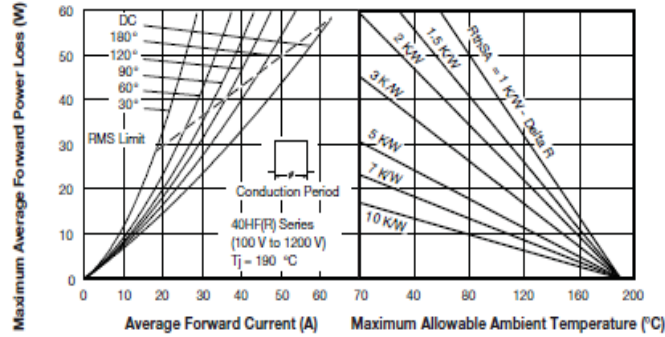


Fig. 6 - Forward Power Loss Characteristics

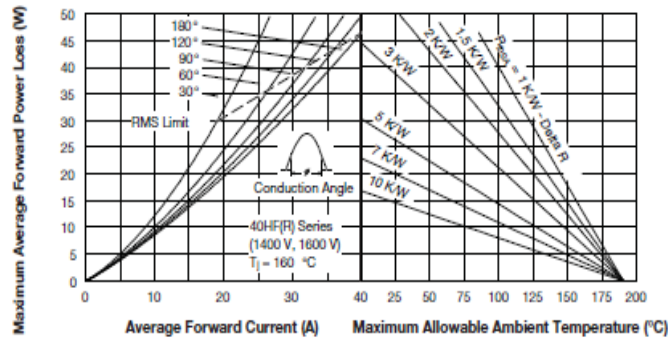


Fig. 7 - Forward Power Loss Characteristics

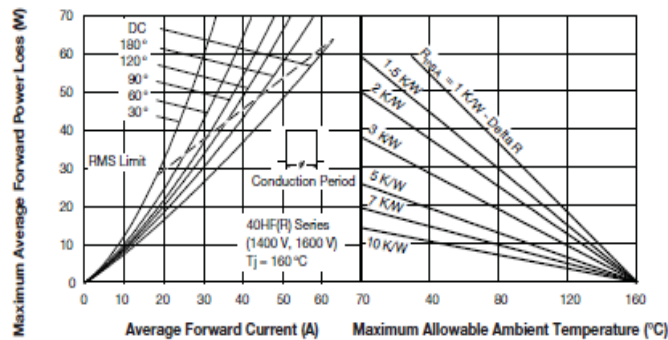


Fig. 8 - Forward Power Loss Characteristics

HOJA DE INSPECCIÓN DE LOS IGBT's USADOS EN EL INVERSOR:



STGB10NC60HD - STGD10NC60HD
STGF10NC60HD - STGP10NC60HD

600 V - 10 A - very fast IGBT

Features

- Low on-voltage drop ($V_{CE(sat)}$)
- Low C_{RES} / C_{IES} ratio (no cross-conduction susceptibility)
- Very soft ultra fast recovery antiparallel diode

Applications

- High frequency motor controls
- SMPS and PFC in both hard switch and resonant topologies
- Motor drivers

Description

This IGBT utilizes the advanced PowerMESH™ process resulting in an excellent trade-off between switching performance and low on-state behavior.

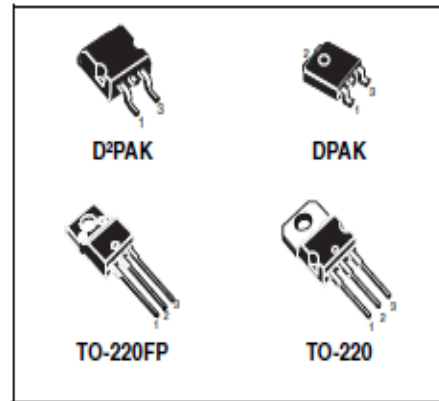


Figure 1. Internal schematic diagram

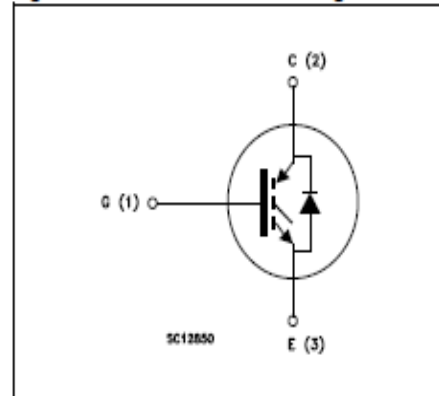


Table 1. Device summary

Order codes	Marking	Package	Packaging
STGB10NC60HDT4	GB10NC60HD	D ² PAK	Tape and reel
STGD10NC60HDT4	GD10NC60HD	DPAK	
STGF10NC60HD	GF10NC60HD	TO-220FP	Tube
STGP10NC60HD	GP10NC60HD	TO-220	

1 Electrical ratings

Table 2. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value			Unit
		TO-220 / D ² PAK	DPAK	TO-220FP	
V _{CES}	Collector-emitter voltage (V _{GE} = 0)	600			V
I _C ⁽¹⁾	Collector current (continuous) at T _C = 25 °C	20		9	A
I _C ⁽¹⁾	Collector current (continuous) at T _C = 100 °C	10		6	A
I _{CL} ⁽²⁾	Turn-off latching current	30			A
I _{CP} ⁽³⁾	Pulsed collector current	30			A
V _{GE}	Gate-emitter voltage	±20			V
I _F	Diode RMS forward current at T _C = 25 °C	10			A
I _{FSM}	Surge not repetitive forward current t _p = 10 ms sinusoidal	20			A
P _{TOT}	Total dissipation at T _C = 25 °C	65	62	24	W
V _{ISO}	Insulation withstand voltage (RMS) from all three leads to external heat sink (t = 1 s; T _C = 25 °C)			2500	V
T _J	Operating junction temperature	- 55 to 150			°C

1. Calculated according to the iterative formula:

$$I_C(T_C) = \frac{T_{j(max)} - T_C}{R_{thj-c} \times V_{CE(sat)(max)}(T_{j(max)}, I_C(T_C))}$$

2. V_{damp} = 80 % (V_{CES}), V_{GE} = 15 V, R_G = 10 Ω, T_J = 150 °C

3. Pulse width limited by max junction temperature allowed

Table 3. Thermal resistance

Symbol	Parameter	Value			Unit
		D ² PAK TO-220	DPAK	TO-220FP	
R _{thj-case}	Thermal resistance junction-case IGBT max.	1.9	2.0	5.1	°C/W
R _{thj-case}	Thermal resistance junction-case diode max.	4	4.5	7	°C/W
R _{thj-amb}	Thermal resistance junction-ambient max.	62.5	100	62.5	°C/W



Electrical characteristics STGB10NC60HD, STGD10NC60HD, STGF10NC60HD, STGP10NC60HD

2 Electrical characteristics

($T_{CASE} = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified)

Table 4. Static

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)CES}$	Collector-emitter breakdown voltage ($V_{GE} = 0$)	$I_C = 1\text{ mA}$	600			V
$V_{CE(sat)}$	Collector-emitter saturation voltage	$V_{GE} = 15\text{ V}, I_C = 5\text{ A}$ $V_{GE} = 15\text{ V}, I_C = 5\text{ A},$ $T_C = 125\text{ °C}$		1.9	2.5	V
				1.7		V
$V_{GE(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\text{ }\mu\text{A}$	3.75		5.75	V
I_{CES}	Collector cut-off current ($V_{GE} = 0$)	$V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{CE} = 600\text{ V}, T_C = 125\text{ °C}$			150	μA
					1	mA
I_{GES}	Gate-emitter leakage current ($V_{CE} = 0$)	$V_{GE} = \pm 20\text{ V}$			± 100	nA
$g_{fs}^{(1)}$	Forward transconductance	$V_{CE} = 15\text{ V}, I_C = 5\text{ A}$		3.5		S

1. Pulse duration = 300 μs , duty cycle 1.5 %

Table 5. Dynamic

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
C_{ies}	Input capacitance	$V_{CE} = 25\text{ V}, f = 1\text{ MHz},$ $V_{GE} = 0$		365		pF
C_{oes}	Output capacitance			43		pF
C_{res}	Reverse transfer capacitance			8.3		pF
Q_g	Total gate charge	$V_{CE} = 390\text{ V}, I_C = 5\text{ A},$		19.2		nC
Q_{ge}	Gate-emitter charge	$V_{GE} = 15\text{ V}$		4.5		nC
Q_{gc}	Gate-collector charge	(see Figure 19)		7		nC



STGB10NC60HD, STGD10NC60HD, STGF10NC60HD, STGP10NC60HD Electrical characteristics

Table 6. Switching on/off (inductive load)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$ t_r $(di/dt)_{on}$	Turn-on delay time Current rise time Turn-on current slope	$V_{CC} = 390\text{ V}$, $I_C = 5\text{ A}$ $R_G = 10\ \Omega$, $V_{GE} = 15\text{ V}$, <i>(see Figure 18)</i> <i>(see Figure 20)</i>		14.2 5 1000		ns ns A/ μ s
$t_{d(on)}$ t_r $(di/dt)_{on}$	Turn-on delay time Current rise time Turn-on current slope	$V_{CC} = 390\text{ V}$, $I_C = 5\text{ A}$ $R_G = 10\ \Omega$, $V_{GE} = 15\text{ V}$, $T_C = 125\text{ }^\circ\text{C}$ <i>(see Figure 18)</i> <i>(see Figure 20)</i>		14 5 920		ns ns A/ μ s
$t_r(V_{off})$ $t_{d(off)}$ t_f	Off voltage rise time Turn-off delay time Current fall time	$V_{CC} = 390\text{ V}$, $I_C = 5\text{ A}$, $R_{GE} = 10\ \Omega$, $V_{GE} = 15\text{ V}$ <i>(see Figure 18)</i> <i>(see Figure 20)</i>		27 72 85		ns ns ns
$t_r(V_{off})$ $t_{d(off)}$ t_f	Off voltage rise time Turn-off delay time Current fall time	$V_{CC} = 390\text{ V}$, $I_C = 5\text{ A}$, $R_{GE} = 10\ \Omega$, $V_{GE} = 15\text{ V}$, $T_C = 125\text{ }^\circ\text{C}$ <i>(see Figure 18)</i> <i>(see Figure 20)</i>		50 108 139		ns ns ns

Table 7. Switching energy (inductive load)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$E_{on}^{(1)}$ $E_{off}^{(2)}$ E_{ts}	Turn-on switching losses Turn-off switching losses Total switching losses	$V_{CC} = 390\text{ V}$, $I_C = 5\text{ A}$ $R_G = 10\ \Omega$, $V_{GE} = 15\text{ V}$, <i>(see Figure 18)</i>		31.8 95 126.8		μ J μ J μ J
$E_{on}^{(1)}$ $E_{off}^{(2)}$ E_{ts}	Turn-on switching losses Turn-off switching losses Total switching losses	$V_{CC} = 390\text{ V}$, $I_C = 5\text{ A}$ $R_G = 10\ \Omega$, $V_{GE} = 15\text{ V}$, $T_C = 125\text{ }^\circ\text{C}$ <i>(see Figure 18)</i>		61.8 173 234.8		μ J μ J μ J

1. E_{on} is the turn-on losses when a typical diode is used in the test circuit in [Figure 18](#). If the IGBT is offered in a package with a co-pak diode, the co-pak diode is used as external diode. IGBTs & Diode are at the same temperature (25 °C and 125 °C)

2. Turn-off losses include also the tail of the collector current



Electrical characteristics STGB10NC60HD, STGD10NC60HD, STGF10NC60HD, STGP10NC60HD

Table 8. Collector-emitter diode

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_F	Forward on-voltage	$I_F = 5 \text{ A}$		2	2.45	V
		$I_F = 5 \text{ A}, T_C = 125 \text{ }^\circ\text{C}$		1.7		V
t_{rr}	Reverse recovery time	$I_F = 5 \text{ A}, V_R = 40 \text{ V},$		22		ns
Q_{rr}	Reverse recovery charge	$di/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$		14		nC
I_{rrm}	Reverse recovery current	(see Figure 2f)		1.3		A
t_{rr}	Reverse recovery time	$I_F = 5 \text{ A}, V_R = 40 \text{ V},$		33		ns
Q_{rr}	Reverse recovery charge	$T_C = 125 \text{ }^\circ\text{C}, di/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$		30		nC
I_{rrm}	Reverse recovery current	(see Figure 2f)		1.85		A