



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“MODELADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON
PANELES FOTOVOLTAICOS Y CARGAS DE CD”

T E S I S

QUE PRESENTA:

Maximiliano Osorio Sánchez

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

ASESOR DE TESIS

Dr. Gilberto González Avalos

Morelia Michoacán, julio 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi Honorable a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y a todos los profesores que, a lo largo de mi carrera me brindaron su apoyo incondicionalmente así como transmitirme todos sus conocimientos.

También agradezco especialmente a mi familia, a mis padres y a mis hermanos que me apoyaron incondicional y económicamente para cumplir una de mis metas que es culminar mi carrera profesional ya que sin su apoyo no hubiera sido posible lograrlo.

Agradezco infinitamente a mi asesor Dr. Gilberto Gonzales avalos por haberme dado nuevamente la oportunidad en cumplir mi meta, gracias a su paciencia, apoyo y dedicación se cumplió este trabajo de tesis bajo su dirección.

Finalmente agradecer a todos mis amigos y compañeros de la facultad que me apoyaron incondicionalmente ya que con su apoyo moral han aportado un porcentaje a mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

CONTENIDO

Agradecimientos	i
CONTENIDO	ii
Lista de Figuras	vi
Lista de tablas	viii
Lista de términos	ix
Resumen	x
Abstract	xi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo	1
1.1.1 Objetivo particular	2
1.2 Justificación	2
1.3 Metodología	2
1.4 Contenido de la tesis	2
CAPÍTULO 2	4
Antecedentes de electrónica de potencia	4
2.1 Introducción	4
2.2 Aplicaciones de la electrónica de potencia	7
2.3 Clasificación de los sistemas de potencia	7
2.4 Conversión alterna-continua	8
2.5 Conversión alterna-alterna	9
2.6 Conversión directa-alterna	9
2.7 Conversión directa-directa	10
2.8 Componentes en la electrónica de potencia	11
2.8.1 Diodos	11
2.8.2 Diodos Schottky	12
2.8.3 Diodos de recuperación rápida	12
2.8.4 Diodos de frecuencia de línea	12

2.8.5	Tiristores.....	12
2.8.6	Conmutadores controlables.....	14
2.8.7	Transistor de unión bipolar (BJT).....	16
2.8.8	Tiristor GTO	17
2.8.9	Transistor de efecto de campo metal-oxido –semiconductor (MOSFET).....	17
2.8.10	Transistor Bipolar de puerta aislada (IGBTs).....	18
2.8.11	Tiristores controlados por MOSFET (MCT)	19
2.9	Campos de aplicación	20
CAPÍTULO 3.....		21
Modelado del sistema de generación (Paneles Fotovoltaicos).....		21
3.1	Introducción	21
3.2	Sistema de generación solar	22
3.3	Funcionamiento de las celdas fotovoltaicas	23
3.4	Curvas características.....	25
3.5	Aplicaciones de las celdas fotovoltaicas	27
3.6	Aplicaciones en los sistemas Eléctricos de potencia	28
3.7	Elección de los componentes para un sistema fotovoltaico.....	29
3.8	Elección de conductores en celdas fotovoltaicas	29
3.9	Baterías.....	30
a)	Capacidad.....	31
b)	Ritmos de carga y descarga.....	31
c)	Temperatura.....	31
d)	Profundidad de descarga.....	31
e)	Selección de baterías.....	31
3.10	Reguladores de carga	34
3.11	Clasificación de los paneles solares según los tramos de potencia eléctrica....	36
a)	Paneles solares de 12V.	36
b)	Paneles solares de 24V.	36
c)	Paneles de conexión a la red.....	36
3.12	Sistema residencial autónomo con potencia de 3kW	36
CAPÍTULO 4.....		39

Diseño de convertidores	39
4.1 Introducción	39
4.2 Topología básica con un único interruptor controlado	41
4.3 El convertidor reductor (buck)	45
4.3.1 Relaciones entre la tensión y la corriente.....	46
4.3.2 Análisis con el interruptor cerrado.....	48
4.3.3 Análisis con el interruptor abierto.....	49
4.3.4 Rizado de la tensión de salida	51
4.3.5 Análisis en modo de conducción discontinuo	53
4.3.6 Consideraciones de diseño.....	53
4.4 Convertidor elevador (boost)	54
4.4.1 Relaciones entre tensión y la corriente	54
4.4.2 Análisis con el interruptor cerrado.....	55
4.4.3 Análisis con el interruptor abierto.....	56
4.4.4 Rizado de la tensión de salida	59
4.5 Convertidor Reductor-Elevador (buck-boost).....	59
4.5.1 Relaciones entre la tensión y la corriente.....	60
4.5.2 Análisis con el interruptor cerrado.....	60
4.5.3 Análisis con el interruptor abierto.....	61
4.5.4 Rizado de la tensión de salida	64
4.5.5 Análisis en el modo de conducción discontinuo	64
4.6 Convertidor Cuk.....	65
4.7 Convertidor Flyback	68
4.8 Aplicaciones de los convertidores de CD a CD	69
4.9 Diseño de convertidores propuestos.....	71
4.9.1 Diseño de convertidor reductor 5V/2A/10W	72
4.9.2 Diseño de convertidor reductor 12V/2A/24W	74
4.9.3 Diseño de convertidor elevador 19V/3.5A/66W	75
4.9.4 Diseño de convertidor elevador 19V/2.53A/48W	77
CAPÍTULO 5.....	79
Implementación sistemas de generación cargas en CD.....	79

5.1	Introducción	79
5.2	Cálculos de diseño del convertidor reductor 5V/0.5A/2.5W	79
5.3	Diseño del circuito convertidor	81
5.4	Resultados reales obtenidos	84
5.5	Prueba real conectando el panel fotovoltaico	90
CAPÍTULO 6.....		93
Conclusiones y recomendaciones.....		93
6.1	Conclusiones.....	93
6.2	Recomendaciones.....	94
Bibliografía.....		95

Lista de Figuras

Figura 2. 1 Clasificación y ejemplos de los convertidores de energía eléctrica.	8
Figura 2. 2 a) convertidor CA-CD con carga RC b) voltaje de salida.	9
Figura 2. 3 Símbolo y características principales de los diodos.	11
Figura 2. 4 Dispositivos tiristores.	13
Figura 2. 5 Curvas características del proceso de puesta a conducción.	14
Figura 2. 6 Curvas características del proceso de conmutación en un conmutador real.	15
Figura 2. 7 Símbolo y característica V-I de los transistores bipolares.	16
Figura 2. 8 Características de transferencia de un transistor bipolar.	16
Figura 2. 9 Símbolo y característica V-I de los tiristores controlados a corte.	17
Figura 2. 10 Símbolo y característica V-I de los transistores MOSFET.	17
Figura 2. 11 Símbolo y característica V-I de los transistores IGBT.	18
Figura 2. 12 Comparación de la caída de tensión directa de un MOSFET y un IGBT.	18
Figura 2. 13 Símbolo y característica V-I de los transistores MCT.	19
Figura 3. 1 Elementos del sistema de generación solar.	22
Figura 3. 2 Celda solar.	24
Figura 3. 3 Esquema de un sistema fotovoltaico.	25
Figura 3. 4 Relación de corriente contra voltaje y voltaje contra potencia.	25
Figura 3. 5 Efecto de la radiación solar en los paneles fotovoltaicos.	26
Figura 3. 6 Ciclos de baterías automotrices y de ciclo profundo.	33
Figura 3. 7 Precaución en sistemas Fotovoltaicos	34
Figura 3. 8 Conexión de paneles en paralelo.	37
Figura 4. 1 Clasificación de los convertidores de CD-CD conmutados PWM.	41
Figura 4. 2 Inductores y capacitores en régimen permanente.	42
Figura 4. 3 Formas de onda en el inductor.	42
Figura 4. 4 Relación entre la corriente de salida y el valor medio de la misma.	43
Figura 4. 5 Modo de funcionamiento continuo y discontinuo.	44
Figura 4. 6 Parámetros que influyen en el modo de funcionamiento.	44
Figura 4. 7 Conmutador CD-CD básico conmutado.	46
Figura 4. 8 Convertidor CD-CD reductor.	47
Figura 4. 9 a) Tensión en la bobina, b) Corriente en la bobina, c) Corriente del condensador.	49
Figura 4. 10 a) Corriente en el condensador, b) Tensión de rizado en el condensador.	52
Figura 4. 11 Modo de conducción discontinuo para el convertidor reductor.	53
Figura 4. 12 El convertidor elevador.	55
Figura 4. 13 Formas de onda del convertidor elevador.	56

Figura 4. 14	convertidor reductor-elevador.	60
Figura 4. 15	Formas de onda del convertidor reductor-elevador.	62
Figura 4. 16	Diagrama del circuito convertidor Cuk.	65
Figura 4. 17	Diagrama del circuito Flyback.	68
Figura 4. 18	Estructura del convertidor reductor.	72
Figura 4. 19	Estructura del convertidor elevador.	76
Figura 5. 1	Estructura del circuito convertidor reductor.	79
Figura 5. 2	Configuración del integrado TL494.	82
Figura 5. 3	Configuración del TIP32C.	82
Figura 5. 4	Simulación del circuito convertidor reductor.	83
Figura 5. 5	Resultados obtenidos en la simulación.	83
Figura 5. 6	Implementación del circuito en el protoboard.	84
Figura 5. 7	Corriente de entrada del convertidor.	84
Figura 5. 8	Voltaje de salida del convertidor reductor.	85
Figura 5. 9	Señal de conmutación PWM.	86
Figura 5. 10	Señal en el capacitor CT.	86
Figura 5. 11	Corriente en la resistencia de carga.	87
Figura 5. 12	Corriente en el inductor.	87
Figura 5. 13	Funcionamiento del convertidor	88
Figura 5. 14	Corriente de carga en el teléfono.	88
Figura 5. 15	Corriente en el inductor.	89
Figura 5. 16	Porcentaje de carga en el teléfono.	89
Figura 5. 17	Conexión del convertidor al panel fotovoltaico.	90
Figura 5. 18	Voltaje de salida del convertidor.	91
Figura 5. 19	Corriente en la resistencia de carga.	91
Figura 5. 20	Corriente en el inductor.	92
Figura 5. 21	Funcionamiento del Convertidor conectado al panel fotovoltaico y con la carga.	92

Lista de tablas

Tabla 2. 1 Propiedades de los IGBTs.	19
Tabla 3. 1 Características de la batería de ciclo profundo.	33
Tabla 3. 2 Especificación Eléctrica del Panel Solar.	37
Tabla 4. 1 Volumen de mercado de fuentes lineales contra fuentes conmutadas.....	40

Lista de términos

SCR. Rectificador controlado de silicio.

TRIAC. Componente electrónico que se utiliza para el control de la corriente alterna, cuenta con dos terminales dos ánodos y un gate.

BJT. Transistor de unión bipolar.

GTO. Tiristor desactivado por compuerta.

IGBT. Es un transistor bipolar que también consta de tres componentes: un emisor, un colector y una puerta.

RMS. Es el valor del voltaje o corriente en C.A. que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de voltaje o corriente directa.

CC. Corriente continua.

CA. Corriente alterna.

LED. Diodo emisor de luz.

Trr. Tiempo de recuperación inversa.

ON. Estado activado.

OFF Estado desactivado.

MOSFET. Transistor de efecto de campo metal-oxido.

NPN. Negativo, positivo, negativo.

PNP. Positivo, negativo, positivo.

PWM. Modulación por ancho de pulso.

Resumen

MODELADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON PANELES FOTOVOLTAICOS Y CARGAS DE CD

En la actualidad existe un gran número de sistemas de generación con paneles solares fotovoltaicos autónomos y sistemas conectados a la red, ya que estos sistemas son de bajo costo y utilizan energía limpia que no contamina el medio ambiente para generar electricidad, estos sistemas van en aumento de acuerdo a su uso. Los sistemas de generación solar cuentan con inversores de corriente directa a corriente alterna, este inversor convierte la corriente directa que generan los paneles solares a una corriente alterna para poder ser utilizada.

Es decir, el panel solar genera corriente de CD, al utilizar un inversor estamos cambiando la corriente directa que genera el panel a corriente alterna para que nuevamente con el uso de rectificadores cambiar nuevamente la corriente alterna a corriente directa.

Algunos electrodomésticos utilizan la corriente alterna para poder funcionar, pero muchos de ellos funcionan con corriente directa.

Con este trabajo de tesis se diseña un sistema de generación con paneles solares que permita generar hasta 3 KiloWatts pero este sistema utilizará diferentes convertidores de corriente directa a corriente directa de mayor y menor voltaje de salida conectadas directamente a los paneles solares, con esto permitirá optimizar y eliminar el uso de inversores, para conectar diferentes cargas como Televisores, teléfonos celulares, lámparas de CD, bocinas, etc.

Palabras clave: Convertidores, Paneles Fotovoltaicos, diseño, implementación, Proteus 8.

Abstract

At present there is a large number of generation systems with autonomous photovoltaic solar panels and systems connected to the grid, since these systems are cheap and use clean energy that does not pollute the environment to generate electricity, these systems are increasing according to your use. Solar generation systems have direct current inverters to alternating current; this inverter converts the direct current generated by the solar panels to an alternating current to be used.

That is, the solar panel generates DC current, by using an inverter we are changing the direct current generated by the panel to alternating current so that again, with the use of rectifiers, change the alternating current to direct current again.

Some household appliances use alternating current to function, but many of them work with direct current.

With this thesis work, a generation system with solar panels is designed that allows generating up to 3 KiloWatt, but this system will use different converters from direct current to direct current of higher and lower output voltage connected directly to the solar panels, with this It will allow to optimize and eliminate the use of inverters, to connect different loads such as televisions, cell phones, CD lamps, speakers, etc.

Keywords: Converters, Photovoltaic panels, design, implementation, Proteus 8.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

A medida que la tecnología y la eficiencia de las células solares van aumentando, la energía solar fotovoltaica se va haciendo más popular a través de los años, hoy en día hay muchas maneras de hacer un kit de paneles solares gracias a que tienen una mejor eficiencia en la conversión de la energía, además esta tecnología está en completo crecimiento ya que se empiezan a utilizar para alimentar de energía eléctrica a las industrias, comercios y hogares.

La electrónica de potencia juega un papel muy importante ante estos sistemas ya que se requiere de inversores que conviertan la energía de CD generada por el panel fotovoltaico a corriente de CA para posteriormente poder utilizarla.

Algunos dispositivos utilizan corriente alterna para su funcionamiento pero la mayoría requieren de corriente directa como los teléfonos celulares, computadoras, tablets, televisores, etc. Estos dispositivos utilizan diferentes valores de voltaje de CD.

Los convertidores de CD a CD conmutados ofrecen un método para aumentar o disminuir el voltaje de CD en una batería, este método también puede ser útil para utilizarlo en los paneles fotovoltaicos ya que estos generan corriente de CD el cual utilizan la mayoría de los dispositivos electrónicos. Con este método se eliminara la conversión de CD a CA y se busca que la conversión de la corriente sea más eficiente y a bajo costo.

1.1 Objetivo

El objetivo de la tesis es diseñar circuitos convertidores de corriente de CD-CD que estén alimentados por un sistema de paneles fotovoltaicos conectados en paralelo, el diseño de los dispositivos alimentaran dispositivos móviles, televisores, computadoras portátiles entre otros dispositivos que utilicen alimentación de CD.

1.1.1 Objetivo particular

Implementar un circuito convertidor reductor capaz de proporcionar un voltaje de 5V y una corriente de 0.5A los cuales son admitidos por dispositivos móviles a partir de paneles fotovoltaicos.

1.2 Justificación

En un sistema de generación con paneles fotovoltaicos normalmente se usan inversores para convertir una corriente directa a corriente alterna. Ante el incremento de estos sistemas fotovoltaicos es necesario mejorarlos. El propósito de esta investigación es diseñar un convertidor que sea capaz de convertir la corriente continua que genera el panel fotovoltaico a otra corriente continua de manera específica, con la finalidad de reducir el sistema de conversiones de corrientes. Para ello se diseña un convertidor reductor para reducir el voltaje que genera el panel fotovoltaico en el cual se podrán conectar cargas como dispositivos móviles, etc. También se diseña un convertidor elevador para elevar el voltaje producido por el panel fotovoltaico para conectar cargas como televisores, computadoras portátiles, etc.

1.3 Metodología

Se realizará una investigación bibliográfica completa desde el sistema de generación con paneles fotovoltaicos hasta el estudio completo de 5 topologías de convertidores de CD-CD. Para realizar este proyecto se obtendrán las ecuaciones teóricas de diseño de cada uno de los circuitos convertidores de CD-CD, las cuales aportarán las características necesarias para la elección del circuito.

Se implementará el convertidor adecuado que será enfocado en el diseño, en esta investigación se realizarán convertidores elevador y reductor para alimentar diferentes dispositivos que utilicen una corriente continua para su funcionamiento.

1.4 Contenido de la tesis

En el capítulo 1. Se describe los diferentes tipos de convertidores de potencia, convertidor CA-CD, convertidores de CA-CA, convertidores de CD-CD, inversores CD-CA, así como las características de cada uno de ellos.

En el capítulo 2. Se describen los antecedentes del surgimiento de la electrónica de potencia así como sus aplicaciones dentro de las industrias, la clasificación de la mismas, descripción breve de cada una de las diferentes conversiones de potencia que se utilizan en los sistemas electrónicos de potencia, características de los diferentes componentes de la electrónica de potencia y sus aplicaciones en dispositivos electrónicos.

En el capítulo 3. Aquí se desarrolla el modelado del sistema de generación con paneles fotovoltaicos, dando una breve descripción del descubrimiento de los paneles solares así como el funcionamiento de las celdas fotovoltaicas, las aplicaciones en los sistemas eléctricos de potencia y los diferentes componentes en los sistemas fotovoltaicos. Se implementa una conexión de paneles en paralelo para generar una potencia máxima de 3kw.

En el capítulo 4. Se analizan las topologías de convertidores de CD-CD, el convertidor elevador, el convertidor reductor, el convertidor elevador-reductor, el convertidor Cuk, el convertidor flyback, sus diferentes aplicaciones en la electrónica de potencia y se diseñan convertidores como el convertidor reductor para cargas como dispositivos móviles, el convertidor elevador para cargas como televisores, computadoras portátiles.

En el capítulo 5. Se implementa el sistema de generación, se utilizará el panel solar fotovoltaico del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, este panel genera un voltaje de 33V en circuito abierto y una corriente máxima de 12.3A este panel será conectado a un convertidor reductor y generará una tensión de salida de 5V y una corriente de 2A generando una potencia de 10W

CAPÍTULO 2

Antecedentes de electrónica de potencia

2.1 Introducción

La electrónica de potencia tiene sus inicios en el año de 1900, con la introducción del rectificador del arco de mercurio, luego aparecieron el rectificador de tanque metálico, el rectificador de tubo al alto vacio de rejilla controlada. Estos se aplicaron al control de la energía hasta la década de 1950. En 1948 se inicia la primera revolución electrónica con la invención del transistor de silicio en los Bell **Telephone Laboratories** por los señores **Bardeen, Brattain y schockley**. Otros de los grandes inventos fue la del transistor de disparo PNPN que se definió como tiristor o rectificador controlado de silicio (SCR). La segunda revolución electrónica fue en 1958 con el desarrollo del tiristor comercial por **General Electric Company**. Fue el principio de la nueva era de la electrónica de potencia, hasta la fecha se han introducido diversos dispositivos semiconductores de potencia y técnicas de conversión. La revolución de la electrónica de potencia nos está dando la capacidad de dar forma y controlar grandes cantidades de energía con una eficiencia cada vez mayor.[7]

Durante muchos años ha existido la necesidad de controlar la potencia electrónica de los sistemas de tracción y de los controles industriales impulsados por motores eléctricos, esto ha llevado un temprano desarrollo del sistema Ward-Leonard con el objetivo de obtener un voltaje de corriente directa variable para el control de los motores e impulsadores. La electrónica de potencia ha revolucionando la idea del control para la conversión de potencia y para el control de los motores electrónicos.

La electrónica de potencia combina la energía, la electrónica y el control. El control se encarga del régimen permanente y de las características dinámicas de los sistemas de lazo cerrado, la energía tiene que ver con el equipo de energía de potencia estática y rotativa o

giratoria para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. La electrónica se ocupa de los dispositivos y circuitos de estado sólidos requeridos en el procesamiento de señales para cumplir con los objetivos de control deseados. La electrónica de potencia se puede definir como la aplicación de electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica.

La electrónica de potencia se basa, en primer término, en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia. Con el desarrollo de la tecnología de los semiconductores de potencia, las capacidades del manejo de la energía y la velocidad de conmutación de los dispositivos de potencia se han elevado.

Puede contribuir al ahorro energético mediante la optimización del consumo tanto en la industria como en servicios y viviendas, la regulación de la velocidad de los motores eléctricos es una de las aplicaciones más utilizadas de la electrónica de potencia habiendo superado el estricto marco industrial y habiendo llegado actualmente a los equipos de aire acondicionado, lavadoras y ascensores.

Es también la tecnología clave para poder poner en marcha todos los recursos de energías renovables como son la eólica, y la fotovoltaica, junto con los nuevos sistemas de almacenamiento de energía, como pueden ser las pilas de combustibles, baterías, supercondensadores, volantes de inercia y bobinas superconductoras. En el campo de la movilidad, la electrónica de potencia es la tecnología base del coche eléctrico y está aportando grandes innovaciones a los transportes ferroviarios que deben experimentar un gran desarrollo futuro. Procesar inteligentemente la energía en los sistemas de potencia construye una de las aplicaciones que ofrecen mayores posibilidades. [7]

Donde se hace más patente la gran importancia actual de la electrónica de potencia es en el ahorro de energía de los equipos eléctricos mediante un uso más eficiente de la electricidad. Se estima que aproximadamente se puede ahorrar entre un 15% y un 20% del consumo eléctrico mediante una aplicación extensiva de la electrónica de potencia. Aproximadamente del 60% al 65% de la electricidad generada es consumida por motores eléctricos y la mayoría de estos accionan bombas y ventiladores. De nuevo la eficiencia energética de la mayoría de estas bombas y ventiladores puede beneficiarse del control a velocidad variable. Tradicionalmente, la variación de flujo de los flujos impulsados por estos equipos se consigue mediante válvulas obturadoras, mientras que los motores de inducción siguen girando a su velocidad fija nominal. Se puede demostrar que el funcionamiento de los motores y válvulas totalmente abiertas con velocidad variable puede ahorrar hasta 30% de energía en condiciones cargas ligeras. El funcionamiento de los motores de inducción con poca carga se puede optimizar haciéndole trabajar a flujo de excitación magnética reducido con lo que se consiguen ahorros del 20%. Como el costo de la electrónica de potencia sigue disminuyendo, es posible instalar arrancadores de frecuencia variable en la alimentación de motores, aunque sea en aplicaciones de

velocidad constante, permitiendo programar el control del flujo de excitación del motor, con el consecuente ahorro de energía.

Se estima que el 20% de energía generada se consume en la iluminación. Las lámparas fluorescentes tienen un rendimiento energético tres veces más elevado que las de incandescencia. La utilización de las reactancias de electrónica de potencia de elevadas frecuencias puede mejorar este rendimiento todavía un 20% adicional. La comercialización a gran escala de las nuevas fuentes de luz de altísimo rendimiento como son los LED de luz blanca necesitará la incorporación de la electrónica de potencia.

El actual progreso de la electrónica de potencia ha sido posible principalmente gracias a los avances en los dispositivos semiconductores de potencia junto con las nuevas propuestas de topologías de convertidores de modulación PWM, modelos analíticos, métodos de simulación, algoritmos de control y estimulación, microcontroladores, circuitos integrados etc. Aunque históricamente la electrónica de potencia empezó en el año 1901 con la disponibilidad de la válvula rectificadora de arco de mercurio, no fue hasta la aparición del tiristor en los años 50 cuando empezó la era moderna de la electrónica de potencia de estado sólido. Gradualmente fueron apareciendo otros componentes semiconductores de potencia que se beneficiaron de los avances de la microelectrónica. Esta evolución de los componentes unida a la evolución de los convertidores estáticos y del control ha sido muy espectacular en la última década del siglo XX llevando a la electrónica de potencia a su actual estado de madurez que la convierte en una tecnología estratégica para el futuro de la humanidad. [7]

El tiristor que fue el componente que dominó la primera generación de la electrónica de potencia, actualmente sigue siendo indispensable en las aplicaciones de gran potencia y baja frecuencia como son los rectificadores de la corriente de la red alterna, interruptores estáticos, compensadores estáticos de energía reactiva por control de fase, onduladores autoconmutados para motores síncronos de muy elevadas potencias, procesos electrolíticos y sistemas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión continua. Para aplicaciones de alta potencia y tensión se dispone actualmente de tiristores activados por la luz de 8kV y 3.5kV con caídas directas de tensión de 2.7 a 3.5kV. Como las órdenes de disparo se envían en forma de luz por fibra óptica se dispone de suficiente aislamiento como para utilizarlos en aplicaciones de 259kV.

Durante muchos años fueron muy populares los circuitos de conmutación forzada de los tiristores que dejaron de usarse con la aparición del tiristor GTO (tiristor conmutado por la compuerta), el primer interruptor de potencia que se podía controlar tanto al cerrar como al abrir. En la actualidad se fabrican solamente GTO para aplicaciones de muy alta tensión y potencia, 6kV, 6kA y están en desarrollo GTO de 9kV y 12 kV. [7]

La necesidad de complejos circuitos de puerta y de ayuda a la conmutación y las bajas frecuencias a las que se puede conmutar del orden de 500Hz hacen que el GTO quede

relegado a aplicaciones de muy alta tensión, como pueden ser la tracción y los sistemas eléctricos de potencia. La disponibilidad de los modernos IGBT de alta tensión hace que el GTO haya perdido algunos de sus campos de aplicación tanto en tracción como en grandes convertidores de frecuencia industriales y también en la red eléctrica de alta tensión.[7]

2.2 Aplicaciones de la electrónica de potencia

El desarrollo de la tecnología de los microprocesadores-microcomputadoras tiene un gran impacto sobre el control y la síntesis de la estrategia de control para los dispositivos semiconductores de potencia, el equipo de electrónica de potencia moderno utiliza semiconductores de potencia que pueden compararse con el musculo y micro electrónico que tiene el poder y la inteligencia del cerebro.

La electrónica de potencia ha alcanzado ya un lugar importante en la tecnología moderna y se utiliza ahora en una gran diversidad de productos de alta potencia que incluyen: controles de calor, controles de iluminación, controles de motor, controles de iluminación, fuentes de alimentación, sistemas de propulsión de vehículos, sistemas de corriente directa de alto voltaje.

2.3 Clasificación de los sistemas de potencia

Los sistemas electrónicos de potencia consisten en uno o más convertidores de potencia, que gobiernan la transferencia de energía. El convertidor es el módulo básico en un sistema de potencia. En general un convertidor controla y modela la magnitud eléctrica de entrada V_i , frecuencia F_i y número de fases m_i en una magnitud eléctrica de salida V_o , frecuencia F_o y número de fase m_o , la potencia puede fluir de forma reversible intercambiándose los papeles entre la entrada y la salida. Es un hecho que la electrónica de potencia es una disciplina emergente dentro de la electrónica, su utilización se extiende de forma amplia en los sectores como residencial, la industria o militar. Recientemente el papel de la electrónica de potencia ha venido ganando con un especial significado en relación a la conservación de la energía y el control del medio ambiente, la realidad es que la demanda de energía eléctrica crece con relación a la mejora de la calidad de vida. [2]

Está basada en la descripción de los principales sistemas que se encargan de procesar la energía eléctrica, dado que el desarrollo de esta disciplina es constante, debido fundamentalmente al que está ligada al crecimiento del campo de aplicación y a la mejora

de las prestaciones de los semiconductores de potencia, nuestro objetivo es presentar las estructuras de los convertidores estáticos, sus características y sus campos de aplicación, de esta forma se pretende ser capaz de determinar la manera de transformar la prestación de la energía eléctrica y por tanto de seleccionar y diseñar la estructura de potencia más conveniente para cada caso. De manera que se realice, mediante el citado sistema de potencia, la conversión energética de la manera más eficaz posible. De esta manera se puede abordar el estudio de los distintos convertidores en función de los cuatro tipos de convertidores posibles.

Desde el punto de vista real, dado que el funcionamiento del sistema encargado de transformar el tipo de presentación de la energía eléctrica viene condicionado por el tipo de energía disponible en su entrada, hemos adoptado como criterio para la estructuración del programa de la asignatura: clasificaremos los convertidores estático de energía en función del tipo de energía eléctrica que los alimenta tal y como se muestra en la Figura2.1.

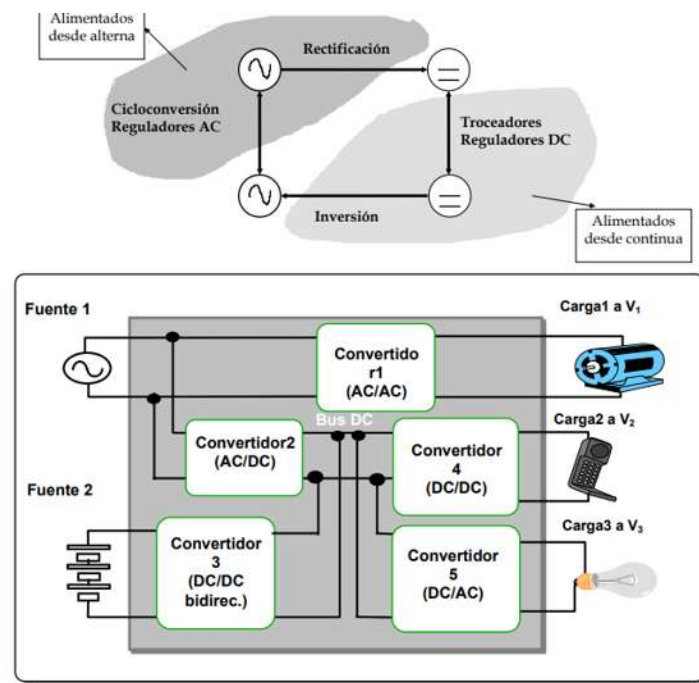


Figura 2. 1 Clasificación y ejemplos de los convertidores de energía eléctrica.

2.4 Conversión alterna-continua

El convertidor proporciona una señal de salida rectificada de valor V_m donde V_m es igual al valor pico del voltaje de entrada, este voltaje casi constante presenta una variación de ΔV_o , este valor se puede considerar muy pequeño y de esta manera encontrar el valor del

resistor y del capacitor para un valor de voltaje directo deseado $\Delta V_o \approx \frac{V_m \pi}{\omega RC}$ en la Figura 2.2.

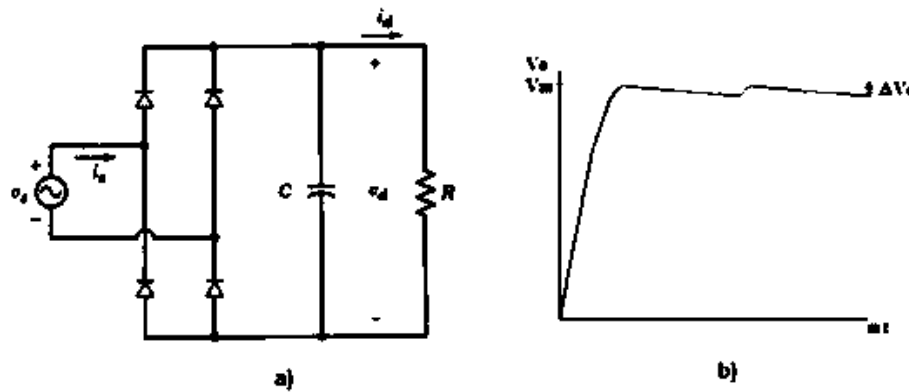


Figura 2. 2 a) convertidor CA-CD con carga RC b) voltaje de salida.

2.5 Conversión alterna-alterna

La conversión de energía de CA a CA permite controlar el voltaje, la frecuencia y la fase de la forma de onda aplicada a una carga desde un sistema de CA suministrado, las dos categorías principales que se pueden utilizar para separar los tipos de convertidores son si se cambia la frecuencia de la forma de onda, los convertidores de CA a CA que no permiten al usuario modificar las frecuencias se conocen como controladores de voltaje de CA o reguladores de CA. Los convertidores de CA que permiten al usuario cambiar la frecuencia se denominan simplemente convertidores de frecuencia para conversión de CA a CA, en los convertidores de frecuencia hay tres tipos diferentes de convertidores que se utilizan normalmente: ciclo convertidor, convertidor de matriz, convertidor de enlace CC

Controlador de voltaje de CA. El propósito de un controlador de voltaje de CA es variar el voltaje RMS a través de la carga mientras se encuentra a una frecuencia constante. Tres métodos de control generalmente aceptados son el control ON/OFF, el control de ángulo de fase y el control chopper de CA con modulación de ancho de pulso, estos tres métodos se pueden implementar en circuitos monofásicos y en circuitos trifásicos.

2.6 Conversión directa-alterna

Los convertidores de CC a CA producen una forma de onda de salida de CA a partir de una fuente de CC, las aplicaciones incluyen unidades de velocidad ajustable, fuentes de alimentación ininterrumpida, sistemas de transmisión de CA, compensadores de voltaje e inversores fotovoltaicos. Las topologías de estos convertidores se pueden dividir en dos

categorías distintas: inversores de fuente de tensión se denominan así porque la salida controlada de forma independiente es una forma de onda de voltaje, los inversores de fuente de corriente se diferencian en que la salida de CA controlada es una forma de onda de corriente.

La conversión de la energía de CC a CA es el resultado de los dispositivos de conmutación de energía, que comúnmente son interruptores de energía de semiconductores totalmente controlables, por lo tanto las formas de onda de salida se componen de valores discretos, lo que produce transiciones rápidas. Para algunas aplicaciones, incluso una aproximación aproximada de la forma de onda sinusoidal de la alimentación de CA es adecuada. Cuando se requiere de una forma de onda casi sinusoidal, los dispositivos de conmutación funcionan mucho más rápido que la frecuencia de salida deseada, y el tiempo que pasan en cualquier estado se controla de modo que la salida promedio sea casi sinusoidal. [2]

Los inversores de fuente de voltaje tienen usos prácticos tanto en aplicaciones monofásicas y trifásicas. Los inversores de fuente de corriente se utilizan para producir una corriente de salida de CA a partir de un suministro de corriente de CC. Este tipo de inversor es práctico para aplicaciones trifásicas en las que se requieren formas de onda de voltaje de alta calidad.

2.7 Conversión directa-directa

Un convertidor de CC a CC es un dispositivo que convierte una fuente de corriente continua de un nivel de voltaje a otro.

Los convertidores de CC a CC se utilizan en dispositivos electrónicos portátiles como los teléfonos celulares y computadoras portátiles, que se alimentan principalmente de baterías. Tales dispositivos electrónicos a menudo contienen varios subcircuitos, cada uno con su propio nivel de tensión. Además el voltaje de la batería disminuye a medida que se agota la energía almacenada. Los convertidores de CC a CC conmutados ofrecen un método para aumentar el voltaje de un voltaje de batería, lo que ahorra espacio en lugar de usar varias baterías para lograr lo mismo.

La mayoría de los circuitos convertidores de CC a CC también regulan el voltaje de salida, algunas excepciones incluyen fuentes de energía LED de alta eficiencia, que son una especie de convertidor de CC a CC que regula la corriente a través de los LED y bombas de carga simples que duplican o triplican el voltaje de salida.

2.8 Componentes en la electrónica de potencia

Los componentes semiconductores de potencia que veremos a continuación se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a su grado de controlabilidad.

2.8.1 Diodos

Es el elemento semiconductor formado por una sola unión PN. En la figura 2.3 se muestra el símbolo y la característica estática corriente-voltaje de dicho componente.

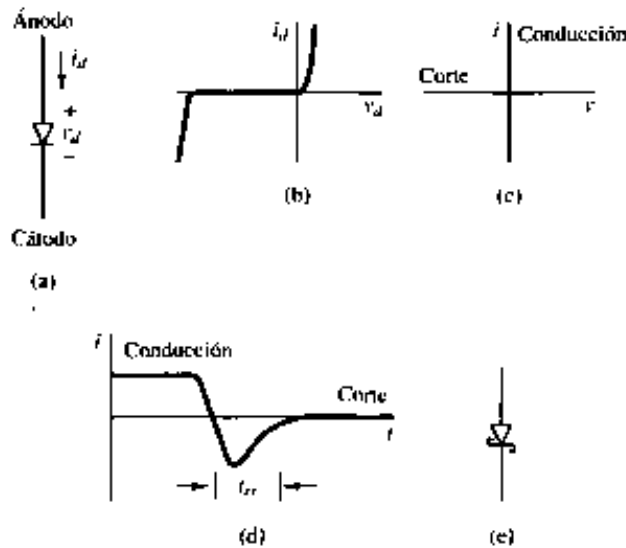


Figura 2. 3 Símbolo y características principales de los diodos.

Son dispositivos unidireccionales, no pudiendo circular corriente en sentido contrario al de conducción, el único procedimiento de control consiste en invertir la tensión ánodo cátodo, no disponiendo de ninguna terminal de control, cabe destacar dos fenómenos:

Recuperación inversa: El paso de conducción a bloqueo no se efectúa instantáneamente pues cuando el diodo conduce una corriente directa I , la zona central de la unión está saturada de portadores mayoritarios, y aunque un circuito externo fuerce la anulación de la corriente aplicándole una tensión inversa cuando la corriente pasa por cero aun existe una cantidad de portadores que cambian su sentido de movimiento y permiten la conducción de una corriente inversa durante un tiempo de recuperación inverso, los parámetros definidos en el proceso de corte dependen de la corriente directa y de la tensión inversa aplicada, el tiempo de recuperación de un diodo normal es del orden de $10\mu s$ siendo el de los rápidos de 0.5 a $2\mu s$.

Recuperación directa: Es otro fenómeno de retardo de menor importancia que el anterior, cuando el diodo pasa de bloqueo a conducción. En el proceso de paso a

conducción la respuesta del diodo es inicialmente de bloqueo a la corriente, siendo esta respuesta quien provoca una sobretensión, ocasionada por la modulación de la conductividad del diodo durante la inyección de los portadores minoritarios, así el diodo se asemeja a una resistencia donde su valor decrece con el tiempo, esta resistencia equivalente está ligada a la concentración de portadores minoritarios inyectados. Dependiendo de las aplicaciones existen diferentes tipos de diodos. [2]

2.8.2 Diodos Schottky

Se utilizan cuando se necesita una caída de tensión directa muy pequeña para circuitos con tensiones de salidas pequeñas, tienen limitada capacidad de bloquear tensión a 50-100V.

2.8.3 Diodos de recuperación rápida

Son adecuados en circuitos de frecuencia elevada en combinación de conmutadores controlables, donde se necesitan varios tiempos de recuperación pequeños, para unos niveles de potencia de varios cientos de voltios y varios cientos de amperios, estos diodos poseen un tiempo de conmutación inverso de pocos microsegundos.

2.8.4 Diodos de frecuencia de línea

La tensión en el estado de ON de estos diodos es la más pequeña posible, y como consecuencia tienen un tiempo de conmutación inverso (t_{rr}) grande, el cual es únicamente aceptable en aplicaciones de la frecuencia de línea. Estos diodos son capaces de bloquear varios kilovoltios y conducir varios kiloamperios. Pudiéndose conectar en serie y/o paralelo para satisfacer cualquier rango de tensión o de corriente.

2.8.5 Tiristores

Dentro de la denominación general de tiristores se consideran todos aquellos componentes semiconductores con dos estados estables cuyo funcionamiento se basa en la realimentación regenerativa de una estructura PNPN. Existen varios tipos de los cuales el más empleado es el rectificador controlado de silicio (SCR), aplicándole el nombre genérico de tiristor.

Dispone de dos terminales, ánodo y cátodo, y uno auxiliar de disparo o puerta. En la Figura 2.4 se muestra el símbolo y la característica estática de dicho componente. La corriente principal circula del ánodo al cátodo, en su estado de OFF puede bloquear una tensión directa y no conducir corriente. Así si no hay señal aplicada a la puerta

permanecerá en bloqueo independientemente del signo de la tensión V_{AK} , el tiristor debe ser disparado a ON aplicando un pulso de corriente positiva en el terminal de puerta, durante un pequeño instante posibilitando que pase al estado de bloqueo directo. La caída de tensión directa en el estado de ON es de pocos voltios (1 a 3V).

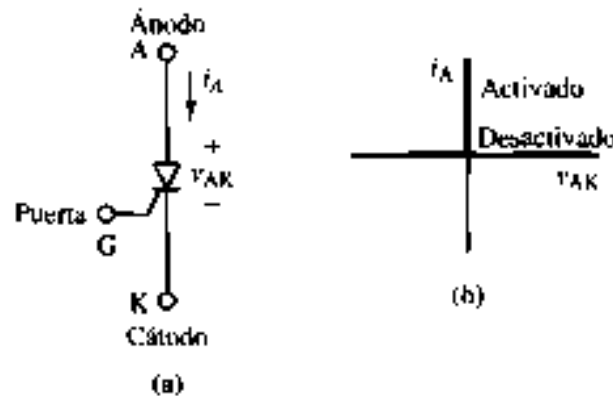


Figura 2. 4 Dispositivos tiristores.

Una vez que empieza a conducir es fijado al estado de ON, aunque la corriente de la puerta desaparezca, no pudiendo ser cortado por pulso de puerta. Solo cuando la corriente del ánodo tiende a ser negativa o inferior a un valor umbral, por la influencia del circuito de potencia se cortará el tiristor. Si un tiristor está polarizado en directa, la inyección de una corriente de puerta al aplicar un voltaje positivo entre G y K activará el tiristor, conforme aumenta la corriente del Gate se reduce el voltaje de bloqueo directo. En el régimen estático dependiendo de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo podemos distinguir tres regiones de funcionamiento.

$V_{AK} < 0$ zona de bloqueo inverso. Dicha condición corresponde al estado de no conducción en inversa comportándose como un diodo.

$V_{AK} > 0$ sin disparo, zona de bloqueo directo. El tiristor se comporta como un circuito abierto hasta alcanzar la tensión de ruptura directa.

$V_{AK} > 0$ con disparo, zona de conducción. Se comportará como un cortocircuito, si una vez ha ocurrido el disparo, por el SCR circula una corriente superior a la corriente de enclavamiento, una vez en conducción se mantendrá si el valor de la corriente ánodo cátodo es superior a la corriente de mantenimiento. En régimen transitorio se destaca dos fenómenos:

Transitorio a conducción: La evolución temporal de las señales se muestra en la Figura 2.5, se observa que desde el momento en que se aplica el impulso de puerta hasta que la intensidad del ánodo empieza a subir, transcurre un tiempo denominado de retardo a la excitación. Después la intensidad sube hasta su valor final en un tiempo t_r . La suma de los tiempos t_r y t_s se denomina tiempo de disparo t_d . Durante el $t_d(ON)$ el tiristor permanece en tiempo de bloqueo. Sin embargo la corriente de puerta esta inyectando portadores

mayoritarios en la unión p cercana al terminal de puerta hasta que aumenta la concentración, momento en que empieza a fluir la corriente de ánodo, llegando a la corriente después del intervalo t_r .

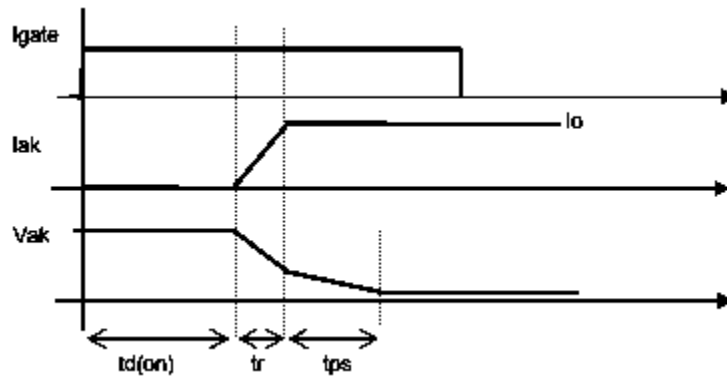


Figura 2. 5 Curvas características del proceso de puesta a conducción.

Transitorio a corte. Si el circuito externo fuerce una reducción muy brusca de la intensidad del ánodo e intenta la conducción en sentido inverso, los portadores de las uniones no pueden reajustarse, por tanto hay un tiempo de retraso por almacenamiento donde se comporta como un cortocircuito conduciendo en sentido contrario al estar polarizado positivamente, produciendo un pico de corriente I_{RRM} . Las restantes cargas se recombinan por difusión. Cuando ha disminuido la concentración, la puerta recupera su capacidad de gobierno pudiendo aplicar tensión directa sin riesgo de cebado. A este tiempo se le denomina tiempo de recuperación de puerta t_{gr} .

2.8.6 Conmutadores controlables

En esta categoría se incluyen diversos dispositivos semiconductores de potencia, incluyendo BJTs, MOSFETs, GTOs e IGBTs, los cuales pueden ser conmutados a conducción y a corte mediante señales de control.

Un conmutador ideal controlado tiene las siguientes características:

- Bloquea cualquier tensión directa o inversa sin que circule a través suya ninguna corriente.
- Conduce cualquier corriente con cero voltios de caída entre sus terminales
- Conmuta de conducción a corte o viceversa instantáneamente cuando es disparado.
- No consume potencia para su control.

Sin embargo los componentes reales no disponen de todas esas características: Bloquean voltajes finitos, disipan potencia, conmutan en tiempos finitos y no son capaces de bloquear voltajes inversos. Estas limitaciones llevan al conmutador real a su destrucción si

no se utiliza correctamente, para considerar la disipación de potencia en un semiconductor consideraremos el circuito de la Figura 2.6.

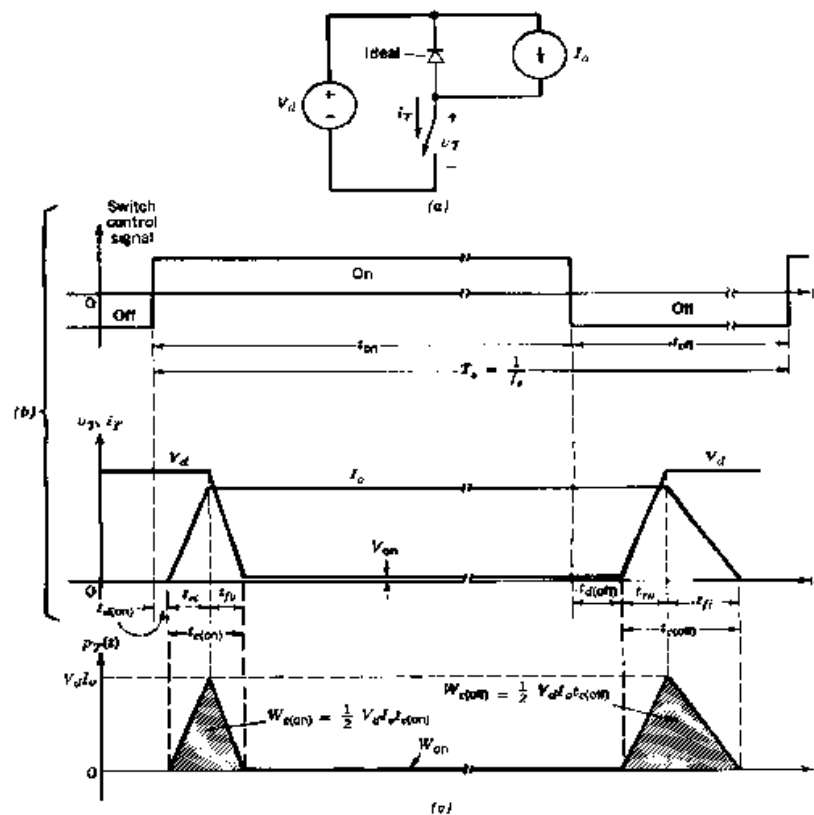


Figura 2. 6 Curvas características del proceso de conmutación en un conmutador real.

Las características deseables en un conmutador controlable se pueden resumir en los siguientes apartados:

1. Pequeña corriente de fuga en el estado de OFF.
2. Pequeña tensión en el estado de ON para minimizar las pérdidas por conducción.
3. Cortos tiempos de turn-on y turn-off. Esto posibilitará su utilización a frecuencias elevadas.
4. Gran capacidad de bloquear tensión directa e inversa.
5. Gran capacidad de conducir corrientes elevadas, así no se necesitaran paralelizar componentes.
6. Coeficiente de temperatura positivo en la resistencia del estado de conducción, esto asegura que al paralelizar componentes estos compartan la corriente.
7. Pequeña potencia para el control.
8. Capacidad para resistir tensión y corriente simultáneamente durante las transiciones de los estados. Así se eliminará la utilización de redes de ayuda a la conmutación.

9. Grandes di/dt y dv/dt . Esto minimizará la necesidad de utilizar redes externas de protección.

2.8.7 Transistor de unión bipolar (BJT)

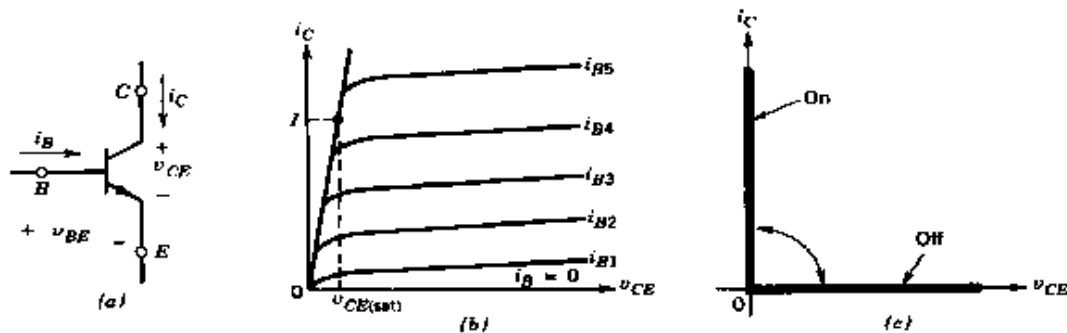


Figura 2. 7 Símbolo y característica V-I de los transistores bipolares.

En la Figura 2.7 se muestra el símbolo y característica estática de un transistor bipolar NPN. Tal como se muestra en su característica V-I una corriente de base suficientemente grande llevará al componente a la plena conducción. En el estado de conducción la tensión $V_{ce(sat)}$ esta normalmente entre 1-2V.

En un transistor bipolar existen tres regiones de operación: de corte, activa y de saturación. En la región de corte el transistor esta desactivado o la corriente de base no es suficiente para activarlo teniendo ambas uniones de polarización inversa. En la región activa, el transistor actúa como un amplificador donde la corriente del colector queda amplificada mediante la ganancia y el voltaje V_{ce} disminuye con la corriente de base: la unión CB tiene polarización inversa y la BE directa. En la región de saturación el transistor actúa como interruptor teniendo una corriente de base lo suficientemente grande para disminuir la V_{ce} : ambas uniones están polarizado directamente. La característica de transferencia se muestra en la Figura 2.8:

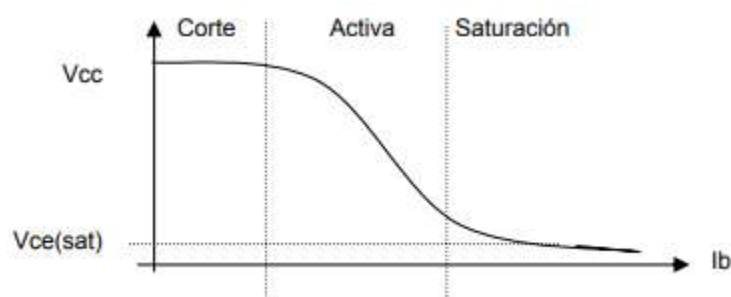


Figura 2. 8 Características de transferencia de un transistor bipolar.

Manejan menores voltajes y corrientes que el SCR, pero son más rápidos. Fáciles de controlar por el terminal de base aunque el circuito de control consume más energía que el de los SCR. Su principal ventaja es la baja caída de tensión en saturación. Como

inconvenientes destacaremos su poca ganancia con v/i grandes, el tiempo de almacenamiento y el fenómeno de avalancha secundaria.

2.8.8 Tiristor GTO

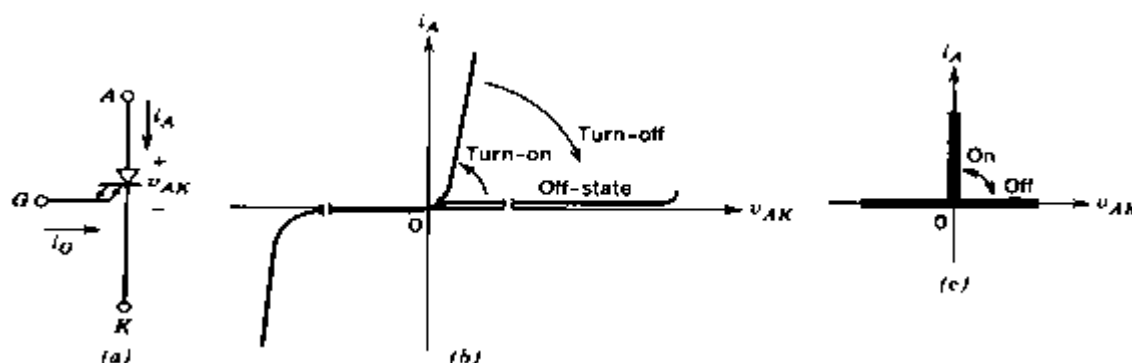


Figura 2. 9 Símbolo y característica V-I de los tiristores controlados a corte.

Funcionamiento muy similar al SCR pero incorporando la capacidad de bloquearse de forma controlada mediante una señal de corriente negativa por la puerta. Mayor rapidez frente a los SCR soportando tensiones y corrientes cercanas a las soportadas por los SCR. Su principal inconveniente es su baja ganancia de corriente durante el apagado lo cual obliga a manejar corrientes elevadas en la puerta complicando el circuito de disparo.

2.8.9 Transistor de efecto de campo metal-oxido –semiconductor (MOSFET)

El control del MOSFET se realiza por tensión, teniendo que soportar solamente un pico de corriente para cargar y descargar la capacidad de puerta. Como ventajas destacan su alta impedancia de entrada, velocidad de conmutación, ausencia de ruptura secundaria, buena estabilidad térmica y facilidad de paralelizarlos. Se muestra el símbolo, característica estática V-I y característica ideal de un MOSFET de canal N.

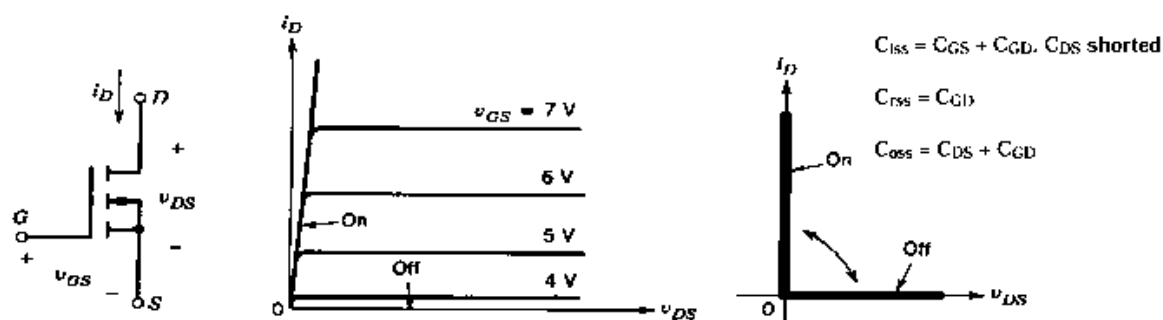


Figura 2. 10 Símbolo y característica V-I de los transistores MOSFET.

La capacidad Gate-to-drain se comporta como una función no lineal con la tensión, siendo uno de los parámetros más importantes al presentar un lazo de realimentación entre la salida y la entrada del circuito. Se suele llamar capacidad de Miller debido a que causa que

la capacidad de entrada dinámica sea mayor que la suma de las capacidades estáticas. Turn-on delay es el tiempo que se tarda en cargar a la capacidad de entrada del componente antes de que la corriente por el drenador comience. Similarmente turn-off delay es el tiempo que se necesita para descargar dicha capacidad.

2.8.10 Transistor Bipolar de puerta aislada (IGBTs)

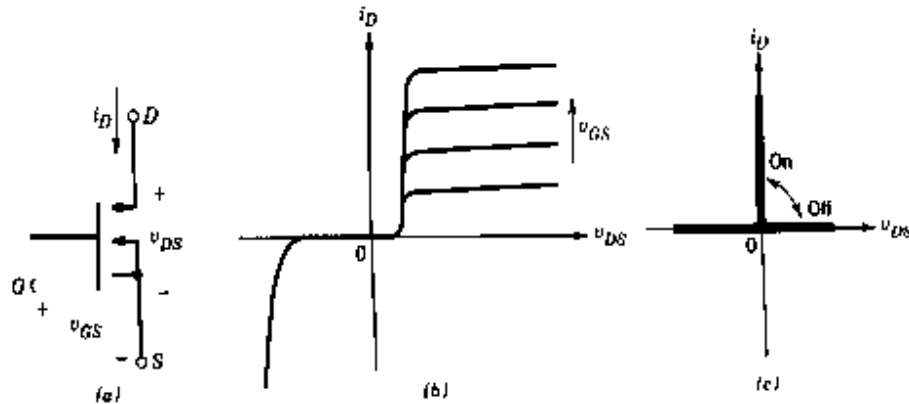


Figura 2. 11 Símbolo y característica V-I de los transistores IGBT.

El IGBT combina las ventajas de los MOSFETs y de los BJTs, aprovechando la facilidad del disparo del MOSFET al controlarlo por la tensión y el tipo de conducción del bipolar, con capacidad de conducir elevadas corrientes con poca caída de tensión. El IGBT tiene una alta impedancia de entrada, como el MOSFET, y bajas pérdidas de conducción en estado activo como el bipolar. Pero no presenta ningún problema de ruptura secundaria como los BJT.

El IGBTs es inherentemente más rápido que el BJT. Sin embargo la velocidad de conmutación del IGBT es inferior a la de los MOSFETs. Se muestra una gráfica donde se compara la caída directa de tensión respecto a la corriente entre un MOSFET y un IGBT de características similares.

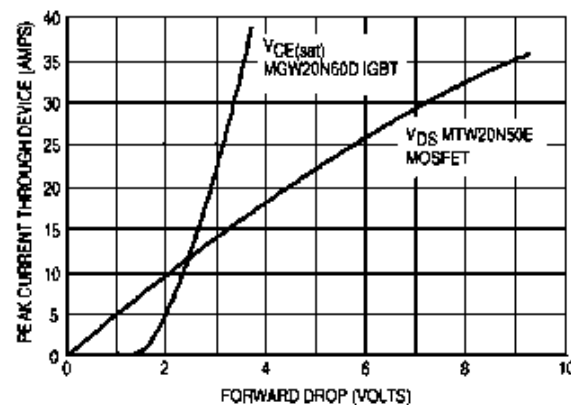


Figura 2. 12 Comparación de la caída de tensión directa de un MOSFET y un IGBT.

Tabla 2. 1 Propiedades de los IGBTs.

Characteristic	TMOS	IGBT	Bipolar
Current Rating	20 A	20 A	20 A
Voltage Rating	500 V	600 V	500 V*
$R_{(on)}$ @ $T_J = 25^{\circ}\text{C}$	0.2 Ω	0.24 Ω	0.18 Ω
$R_{(on)}$ @ $T_J = 150^{\circ}\text{C}$	0.6 Ω	0.23 Ω	0.24 Ω^{**}
Fall Time (Typical)	40 ns	200 ns	200 ns

* Indicates V_{CEQ} Rating

** BJT $T_J = 100^{\circ}\text{C}$

Ventajas del IGBT comparado con el MOSFET y con el transistor Bipolar respecto de la resistencia de ON y del Fall Times.

Destacamos que los componentes de la Tabla 2.1 son de niveles de V/I comparables, sin embargo el transistor bipolar necesita 1.2 veces más área de silicio que el IGBT, y el MOSFET necesita 2.2 veces más área de Silicio que el IGBT para conseguir los mismos niveles de V/I, lo cual incide en el costo del semiconductor. Para corrientes elevadas y temperaturas altas el IGBT ofrece una baja caída de tensión directa con tiempos de conmutación similares al Bipolar son complicaciones en el circuito de disparo.

2.8.11 Tiristores controlados por MOSFET (MCT)

Su símbolo y características se muestran en la figura 2.13.

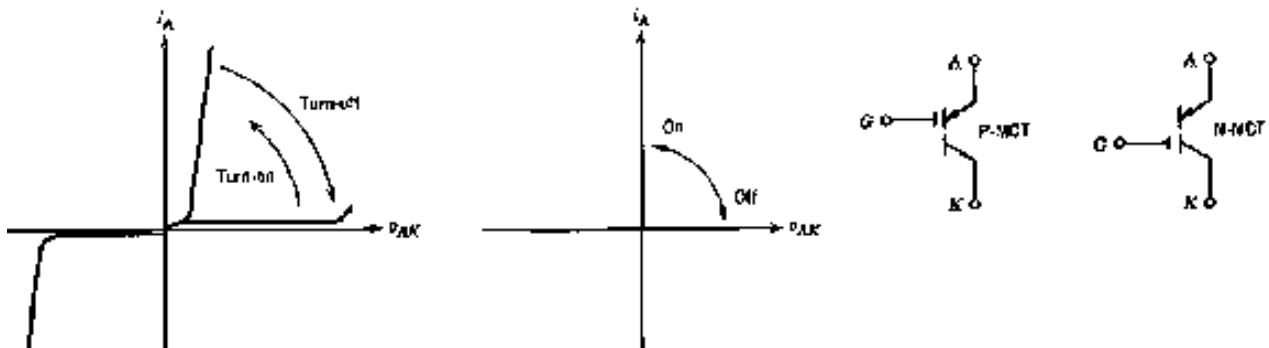


Figura 2. 13 Símbolo y característica V-I de los transistores MCT.

De la característica se observa que el MCT tiene muchas de las propiedades del GTO, incluyendo su baja caída de tensión en su estado de ON para corrientes relativamente grandes junto a su característica de latch (el MCT permanece a ON incluso si la señal de puerta desaparece). El MCT es un dispositivo controlado por tensión, y dispone de dos ventajas principales respecto al GTO: Circuito de disparo más simple al no necesitar corrientes negativas grandes para el turn-off y mayor velocidad en las conmutaciones. Además dispone de una caída de tensión en ON menor que el IGBT.

2.9 Campos de aplicación

Los sistemas de potencia se utilizan para accionar cualquier dispositivo que necesite una entrada de energía eléctrica distinta a la que suministra la fuente de alimentación primaria. Algunas de las aplicaciones industriales de cada uno de los convertidores son:

- **Rectificadores:**

Alimentación de todo tipo de sistemas electrónicos donde se necesite energía eléctrica en forma de corriente continua. Control de motores de continua utilizados en procesos industriales, transporte de energía eléctrica y alta tensión, procesos electroquímicos, cargadores de baterías.

- **Reguladores de alterna:**

Calentamiento por inducción, control de iluminación, equipos para procesos de electrodeposición.

- **Cambiadores de frecuencia:**

Enlace entre dos sistemas energéticos de corriente alterna no sincronizados, alimentación de aeronaves o grupos electrógenos móviles.

- **Inversores:**

Accionadores de motores de corriente alterna en todo tipo de aplicaciones industriales, Convertidores de corriente continua en alterna para fuentes no convencionales tales como la fotovoltaica o eólica, calentamiento por inducción.

- **Troceadores:**

Alimentación y control de motores de continua, alimentación de equipos electrónicos a partir de baterías y /o fuentes autónomas de corriente continua.

CAPÍTULO 3

Modelado del sistema de generación (Paneles Fotovoltaicos)

3.1 Introducción

El descubrimiento del efecto fotovoltaico, la base de las células solares que permiten convertir la luz solar en electricidad, se atribuye al físico francés **Alexandre-Edmond Becquerel** en 1839. Cinco décadas después en 1883, el inventor americano **Charles Fritts** creó la primera célula fotovoltaica. Para ello utilizó un semiconductor de selenio con una fina capa de oro. Era un pequeño dispositivo con una eficiencia del 1%. [6]

El físico alemán **Heinrich Hertz** observó por primera vez el efecto fotoeléctrico, en el que la luz se utiliza para liberar electrones de una superficie sólida para crear energía. Contrario a los resultados esperados, **Hertz** encontró que este proceso producía más potencia cuando se exponía a la luz ultravioleta en lugar de luz visible más intensa. Las células solares modernas dependen del efecto foto eléctrico para convertir la luz solar en energía.

Físicos de los laboratorios Bell, descubrieron que el silicio es más eficiente que el selenio, creando la primera célula solar práctica, ahora con un 6% de eficiencia. Este descubrimiento condujo a la creación de células solares capaces de alimentar equipos eléctricos: En 1956 **Western Electric** comenzó a vender licencias comerciales para sus tecnologías fotovoltaicas de silicio, pero los costos prohibitivos de las células solares de silicio impidieron su comercialización a gran escala. Muchos argumentan que este evento marca la verdadera invención de la tecnología fotovoltaica, ya que fue el primer caso de una tecnología solar que realmente podía alimentar un dispositivo eléctrico durante varias horas al día.

Después de años de experimentos para mejorar la eficiencia y comercialización de la energía solar, la energía solar obtuvo el apoyo cuando el gobierno la utilizó para alimentar equipos de exploración espacial. El primer satélite alimentado por energía solar Vanguard1.

Arco solar construyó el primer parque solar básicamente una planta de energía solar en Hesperia California, en 1982. Este parque genero 1000 kw por hora, mientras operaba a plena capacidad. Esto podía alimentar una bombilla de 100 kw durante 10 horas. En 1983 Arco Solar construyó un segundo parque solar en carrizo Plains, California. En aquel momento era la mayor colección de paneles solares del mundo con 100,000 paneles fotovoltaicos que generaban 5.2 MW a plena capacidad.

A medida que la tecnología y la eficiencia de las células solares iban aumentando, la energía solar residencial se iba volviendo más popular. Los paneles solares de bricolaje comenzaron a llegar al mercado en 2005 y se han vuelto más frecuentes con cada nuevo año. Hoy en día hay muchas maneras de hacer sus propios paneles solares, desde armar un kit de paneles solares hasta planear un arreglo solar. Incluso las células solares tan finas como el papel pueden fabricarse ahora con una impresora industrial. Tienen una eficiencia de conversión de energía del 20% y una sola tira puede producir hasta 50 W por metro cuadrado.[6]

3.2 Sistema de generación solar

Un sistema fotovoltaico o de energía solar es un conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en energía eléctrica adecuada a los requerimientos de una aplicación determinada. Este sistema que se muestra en la Figura 3.1 se compone de tres principales elementos.

Generación o producción (celdas o módulos solares).

Control (reguladores de voltaje).

Almacenamiento (baterías o acumuladores).

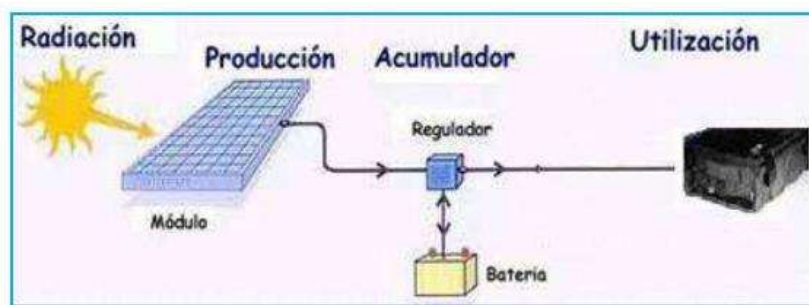


Figura 3. 1 Elementos del sistema de generación solar.

3.3 Funcionamiento de las celdas fotovoltaicas

Las células o celdas solares son dispositivos que convierten la energía solar en electricidad ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química. La forma más común de las celdas solares se basa en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia del voltaje o de potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil para una aplicación determinada. [4]

Las celdas de silicio mono cristalino representan el estado comercial de la tecnología fotovoltaica. Para fabricar el silicio es purificado, fundido y cristalizado ya sea en lingotes o en láminas delgadas, posteriormente el silicio es rebanado en obleas delgadas para formar las celdas individuales, posteriormente las obleas se pulen por ambas caras. Durante el proceso de corte y pulido se desperdicia casi la mitad del material original. Una vez pulidas las obleas se introduce a alta temperatura un material dopante, típicamente boro y fósforo con lo cual se convierte a la oblea en un semiconductor tipo P si se le añadió boro o tipo N si se le añadió fósforo. La mayoría de las celdas fotovoltaicas producen un voltaje de aproximadamente 0.5V independientemente del área superficial de la celda, sin embargo, mientras mayor sea la superficie de la celda mayor será la corriente que entregará.

El espesor requerido para que se lleve a cabo el efecto fotovoltaico y se evite al máximo la recombinación de portadores de carga es del orden de 3 a 4 μm , por este motivo la celda se torna extremadamente frágil ocasionando que en el proceso de manufactura se generen más desperdicios. Existen muchas combinaciones de materiales que poseen las características requeridas para convertir directamente la energía solar con eficiencias mayores que el 13% destacando entre ellas el silicio, sulfuro de cadmio y el arseniuro de galio.

Para la mayoría de aplicaciones en que están relacionadas las celdas fotovoltaicas resulta insuficiente la diferencia de potencial de 0.5 volts generada por una celda, de esta manera las celdas tienen que ser colocadas en serie para que, en conjunto proporcionen el voltaje adecuado. De la misma manera varias de esas series pueden ser colocadas en paralelo para incrementar la corriente.

Posteriormente, las celdas interconectadas en serie y sus conexiones eléctricas se encapsulan y se colocan entre dos placas que pueden ser de vidrio o bien una de vidrio superior y una posterior plástica o metálica. Para absorber esfuerzo mecánicos y con propósitos de montaje se añade un marco metálico. La unidad resultante recibe el nombre de módulo o panel fotovoltaico, el módulo es típicamente la unidad básica de los sistemas

fotovoltaicos. Los módulos pueden interconectarse en serie Y/o en paralelo para formar un arreglo.

Una función importante del encapsulado en los módulos es que las celdas puedan quedar protegidas para que operen bajo condiciones de climas cambiantes, o de posibles daños mecánicos producidos por aves polvo o piedras. El encapsulado proveerá suficiente rigidez para sujetar a las celdas y sus interconexiones. También tiene la función de aislar eléctricamente a las celdas respecto a posibles rupturas dieléctricas. Para los adhesivos encapsulantes y capas intermedias se utilizan resinas de silicón que tiene excelente estabilidad ante la radiación ultravioleta, baja absorción de la luz visible y son suficientemente elásticas para reducir los esfuerzos térmicos en el módulo. En la Figura 3.2 se ilustran los elementos que forman parte de una celda solar.[4]

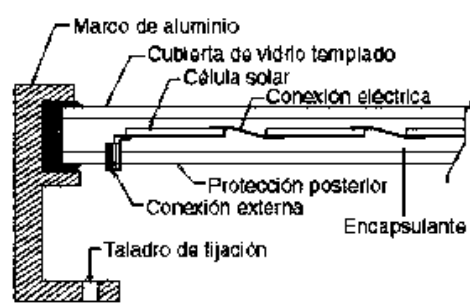


Figura 3. 2 Celda solar.

Además de sus innumerables aplicaciones estos sistemas tiene grandes beneficios al compararlos con otras fuentes de energía.

- No requiere combustible.
- Mínimo mantenimiento.
- Fuente inagotable de energía.
- Sistemas modulares.
- Larga vida.
- No contaminan.
- Sistemas silenciosos.
- Fácil transportación.
- Equipo resistente al medio ambiente externo.

La conexión de las celdas solares para tener un sistema fotovoltaico se ilustra en la Figura 3.3.

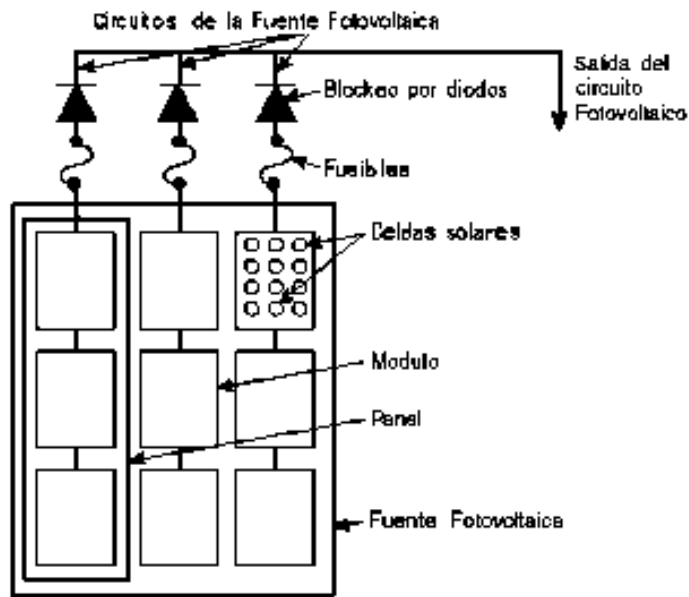


Figura 3. 3 Esquema de un sistema fotovoltaico.

Los diodos de bloqueo impiden que la batería se descargue a través del panel solar cuando se está en ausencia de luz solar. Evitan también que el flujo de corriente se invierta entre bloques de paneles conectados en paralelo, cuando en uno o más de ellos se produce una sombra, en pocas palabras que en periodos de sombras no pase corriente eléctrica de un panel a otro o de la batería a los paneles.

3.4 Curvas características

Existen dos curvas características para las celdas fotovoltaicas, relacionadas una con la otra, que representan la relación entre la corriente o la potencia generada contra el voltaje en los bornes del panel.

Estas curvas características pueden verse en la Figura 3.4.

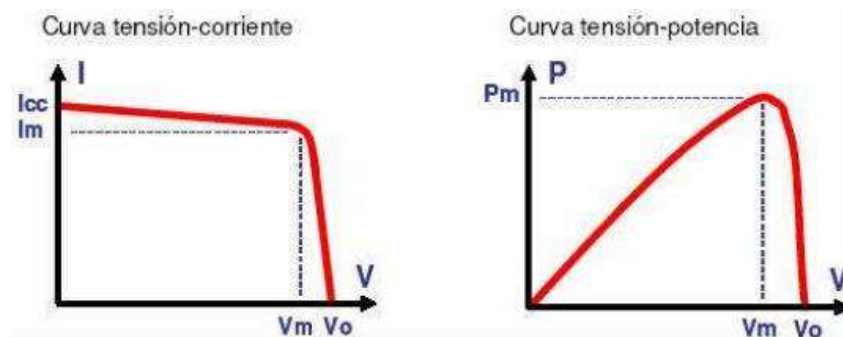


Figura 3. 4 Relación de corriente contra voltaje y voltaje contra potencia.

Donde:

V_o es el voltaje en circuito abierto.

V_m es el voltaje de potencia máxima.

I_m es la corriente de potencia máxima.

P_m es la potencia máxima.

I_{cc} es la corriente de corto circuito.

Relacionado con las gráficas anteriores se encuentra el llamado factor de forma que indica la calidad del panel solar en términos energéticos. Este factor de forma relaciona la potencia máxima que realmente podría ofrecer. El factor de forma generalmente se mueve entre valores de 0.7 y 0.8 y son preferibles valores lo más cercano a 1 posible ya que de esta manera tendríamos que la potencia que entra es igual a la potencia se otorga.[4]

El efecto de la radiación solar en el panel se muestra en la Figura 3.5.

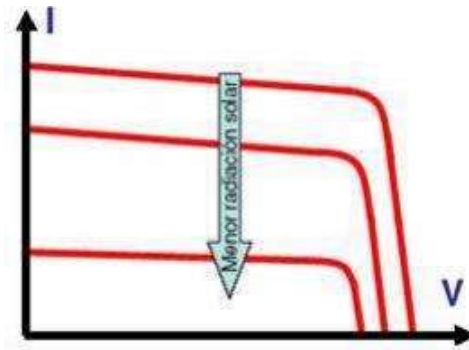


Figura 3. 5 Efecto de la radiación solar en los paneles fotovoltaicos.

Se aprecia que cuanto menor es la luz recibida o de menor intensidad de radiación menor es la potencia máxima que puede ofrecer la celda manteniéndose aproximadamente constante la tensión de circuito abierto.

Aspectos a tener en cuenta:

Una celda solar puede generar energía en días nublados aunque su rendimiento baja con respecto a un día soleado como se puede ver en la Figura 3.5.

La elevación del lugar donde se instala no tiene ninguna relación con la eficiencia del sistema, es decir, que la altura a la que van a ser instaladas las celdas no va a influir en el rendimiento. Los paneles se instalan a cierta altura para evitar sombras y así tener un contacto directo con el Sol.

Otro factor importante es la inclinación de la celda, este debe tener una inclinación de 15° en verano y 30° en invierno con respecto a la horizontal. Esto es debido a que de esta manera se captarán los rayos solares perpendiculares a las celdas y darán un rendimiento óptimo al sistema. Para evitar la constante inclinación de la celda se puede fijar los 30° de invierno y así tendremos también en las otras estaciones del año se capte la mayor energía solar posible. [4]

3.5 Aplicaciones de las celdas fotovoltaicas

A últimos años las energías renovables han tomado un importante auge en la vida cotidiana de todas las personas. En este caso para la generación de energía eléctrica que se consume tanto en los hogares como en la utilización de la industria. Este desarrollo se ha visto más en países como: Alemania, España, EU, Japón, China, Australia y en particular en Europa.

Actualmente, las aplicaciones de los paneles fotovoltaicos son varios ya que en décadas pasadas eran solo utilizados para áreas remotas y de difícil acceso, pero a partir de los años noventa se lanzo una importante propuesta para colocar los tejados fotovoltaicos, principalmente en EU y Japón. En Japón actualmente se tiene el propósito de construir 70,000 hogares que utilicen la tecnología fotovoltaica para así llegar a unos 4,820 MW producidos por sistemas fotovoltaicos.

Una de las aplicaciones que tienen los sistemas fotovoltaicos es la protección catódica. Que es un método de proteger las estructuras de metal contra la corrosión. Es aplicable a puentes, tuberías, edificios, estanques, perforaciones y líneas ferroviarias. Para alcanzar la protección catódica se aplica un pequeño voltaje negativo a la estructura de metal y este evita que se oxide. El terminal positivo de la fuente es conectado a un ánodo galvánico o de sacrificio que es generalmente un pedazo del metal de desperdicio que es corroído en vez de la estructura que se desea proteger.

Las celdas solares fotovoltaicas se utilizan para proporcionar este voltaje. Otra de las aplicaciones que tenemos actualmente es que a menudo se requiere iluminación en lugares lejanos donde el costo de emplear energía de la red es demasiado alto. Tales aplicaciones incluyen la iluminación de seguridad, ayudas a la navegación, señales iluminadas en los caminos, señales en cruces ferroviarios y la iluminación de aldeas. Las celdas solares pueden satisfacer tales usos. Estos sistemas generalmente consisten de un papel fotovoltaico más una batería de almacenaje, un acondicionador de energía y una lámpara fluorescente de corriente continua de baja tensión y alta eficiencia. Estos sistemas son muy populares en áreas lejanas especialmente en países en vías de desarrollo. Las buenas comunicaciones son esenciales para mejorar la calidad de vida en

áreas alejadas. Sin embargo el costo de energía eléctrica para poder hacer funcionar estos sistemas y el alto costo de mantenimiento de los sistemas convencionales han limitado su uso. Los sistemas fotovoltaicos han proporcionado una solución rentable a este problema con el desarrollo de estaciones repetidoras de telecomunicaciones en áreas lejanas. Estas estaciones típicamente consisten de un receptor, un transmisor y un sistema basado en una fuente de alimentación fotovoltaica. Existen miles de estos sistemas instalados alrededor del mundo y tienen una excelente reputación por su confiabilidad y costos relativamente bajos de operación y mantenimiento.

Principios similares se aplican a radios y televisiones acondicionadas por energía solar, los teléfonos de emergencia y los sistemas de monitoreo. Los sistemas de monitoreos remotos se pueden utilizar para recolectar datos del tiempo u otra información sobre el medio ambiente y transmitirla automáticamente vía radio a una central.

Existen más de 10,000 bombas de agua accionadas por energía solar en el mundo. Un típico sistema de bombeo accionado por energía fotovoltaico que acciona un motor eléctrico, el que impulsa la bomba. Los sistemas de bombeo accionados por energía solar se encuentran disponibles en proveedores de equipo agrícola y son una alternativa rentable a los molinos de viento agrícolas para el abastecimiento de aguas en áreas alejadas. [4]

3.6 Aplicaciones en los sistemas Eléctricos de potencia

Actualmente, la tecnología en sistemas fotovoltaicos está en completo crecimiento tal muestra es que en estos momentos se empiezan a utilizar este tipo de tecnología de energía renovable para alimentar de energía eléctrica a las industrias y comercios.

Además, se están empezando a utilizar este tipo de equipos conectados a la red de distribución eléctrica para ayudar a los picos de demanda. Analista dicen que usando paneles fotovoltaicos en una subestación durante los picos de demanda eléctrica llega a tener sentido económico su utilización. Aunque el costo inicial de la inversión parezca alto.

Una de las principales características que se están considerando es que las plantas fotovoltaicas pueden construirse mucho más rápidamente que una planta convencional ya sea nuclear o de combustibles fósiles, además que los módulos fotovoltaicos pueden expandirse si la demanda se incrementa. Pueden ser instalados para la distribución de energía en lugares donde la población está creciendo rápidamente y así eliminar la necesidad de incrementar el tamaño de las líneas de transmisión.

Así como tener más cerca la producción de la energía y evitar pérdidas como las que se tienen en las líneas de transmisión que cubren grandes distancias, instalando equipos fotovoltaicos cerca de las subestaciones se podría evitar la sobrecarga de los equipos en la subestación.

3.7 Elección de los componentes para un sistema fotovoltaico

Al elegir los paneles solares, se debe tomar en cuenta el voltaje de entrega, la corriente, la potencia que se desea obtener de dichos dispositivos y su relación con los índices de temperatura a la que va a trabajar. Es importante también tener en cuenta los siguientes parámetros al elegir un panel fotovoltaico:

I_{sc} es la corriente de corto circuito, ya que es la máxima intensidad de corriente que podrá proporcionar el panel.

V_{oc} es el voltaje de circuito abierto, es el máximo voltaje que podrá proporcionar el panel.

$I_{pM_{ax}}$ es la corriente Pico Máxima.

$V_{pM_{ax}}$ es la Voltaje Pico Máxima.

Ya que la variación de estos parámetros influirá en nuestra PM_{ax} .

$PM_{ax} = I_{pM_{ax}} \times V_{pM_{ax}}$ Que será la máxima potencia entregada por el panel.

Estas curvas son proporcionadas por el fabricante, y en ellas nos podemos dar cuenta de cómo se va a comportar el panel durante los días de mayor radiación y en la ausencia de la radiación solar, para poder elegir el más adecuado.

Todas estas características por lo general son referidas a condiciones estándar como la irradiación de 1000 W/m^2 a nivel del mar y una temperatura de 25°C . Además de las características técnicas en el mercado se ofrecen una gran variedad de paneles para instalación de techo, suelo o fachada.

En la práctica el error que se comete a partir de los valores de $I_{pM_{ax}}$ y $V_{pM_{ax}}$ puede corregirse añadiendo una pérdida de eficiencia del 5% al sistema.

3.8 Elección de conductores en celdas fotovoltaicas

La corriente máxima en los conductores de los circuitos fuente del sistema fotovoltaico debe ser al menos el 125% de la corriente de cortocircuito del módulo o módulos en

paralelo como se plantea en el **Artículo 690-8 de la NOM-001-SEDE-2005**, como es el caso de los circuitos derivados para carga continua. [8]

De la misma manera la ampacidad de los conductores de los circuitos de salida del sistema foto voltaico debe ser al menos el 125% de la corriente de cortocircuito de salida así como los conductores que entran o salen del inversor o sistema de acondicionamiento de potencia debe ser el 125% de la corriente de operación del dispositivo. Con estas exigencias de la **NOM-001-SEDE-2005** así como del NEC (**National Electrical Code**) se asegura que los dispositivos de sobre intensidad o cuadros de mando funcionen a menos del 80% de su corriente máxima. Hay que revisar la ampacidad cuando se prevén salidas del sistema fotovoltaico por encima de lo normal, debido a la presencia de nubes. En muchos lugares, los valores diarios esperados de irradiación superan el valor estándar de ensayo de 1000W/m².

La revisión del estándar **UL 1703 de 1989** (Es una certificación de que el panel solar cumple con las normas de seguridad requeridas por el código eléctrico de estados Unidos), para los módulos fotovoltaicos exige que las instrucciones de instalación de los módulos incluyan un incremento del 25% en las especificaciones de corriente de cortocircuito y tensión a circuito abierto para 25°C, en previsión de picos de irradiación y temperaturas más frías. El diseño correcto implica el dimensionado correcto del cableado y de la capacidad de los limitadores de corriente en los circuitos fuente y de salida del sistema fotovoltaico. Sin embargo la capacidad de los limitadores de corriente debería ser siempre menor o igual que la ampacidad del cable.

Además de los paneles solares tenemos que tener en cuenta en nuestra instalación los siguientes elementos:

Baterías, Cajas de conexión, conectores, conductores, diodos de bloqueo, electrodo de tierra, inversor, protección de falla a Tierra, reguladores de carga, etc.

3.9 Baterías

La misión primordial de la batería es abastecer de energía eléctrica al sistema cuando no la proporciona el campo de paneles, la batería almacena la energía eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos durante los periodos de sol. Normalmente las baterías se utilizan durante las noches o días nublados, el intervalo que incluye un periodo de carga y uno de descarga recibe el nombre de un ciclo. Idealmente las baterías se descargan al 100 por ciento de su capacidad durante el periodo de carga de cada ciclo.

Las baterías más utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas son de 12 o 24 voltios de tensión normal y debemos tener presentes las horas o días de autonomía que debe de tener

nuestro sistema para que esté listo siempre que se requiera. Los parámetros que caracterizan una batería son: [4]

a) Capacidad.

La capacidad en Amper-hora es simplemente el número de amperes que la batería puede descargar, multiplicando por el número de horas en que se entrega dicha corriente. Sirve para determinar en una instalación fotovoltaica, cuánto tiempo puede funcionar el sistema sin radiación luminosa o sin que se recarguen las baterías. Esta medida de los días u horas de autonomía es una de las partes importantes en el diseño de la instalación. Existen factores que pueden hacer variar la capacidad de una batería:

b) Ritmos de carga y descarga.

Si la batería es cargada o descargada a un ritmo diferente al especificado, la capacidad disponible puede aumentar o disminuir. Generalmente si la batería se descarga a un ritmo más lento, su capacidad aumentara ligeramente. Si el ritmo es más rápido la capacidad se disminuirá.

c) Temperatura.

Otro factor que influye en la capacidad es la temperatura de la batería y la de su ambiente. El comportamiento de una batería se toma a una temperatura ambiente de 27°C. Temperaturas más bajas reducen su capacidad significativamente. Temperaturas más altas producen un ligero aumento de su capacidad, pero esto puede incrementar la pérdida de agua y disminuir el número de ciclos de vida de la batería.

d) Profundidad de descarga.

Este parámetro describe la parte de la capacidad total de la batería que puede ser usada sin necesidad de recarga y sin dañar a la batería. Como regla general, mientras menor sea la cantidad de energía que se extrae de la batería durante cada ciclo, mayor será la vida útil de la misma.

e) Selección de baterías.

Las baterías se clasifican en dos grandes grupos: ciclo ligero o automotriz y ciclo profundo. En el ciclo ligero o automotriz las baterías se diseñan para altas descargas iniciales como puede ser el arranque de un motor, pero continuamente se están cargando y descargando de manera alternativa. Estas baterías también llamadas de arranque, se diseñan para profundidades de descarga no mayores del 20%.

De manera contraria las baterías de ciclo profundo se diseñan en función de largos periodos de utilización, sin necesidad de recibir recarga, por lo tanto estas son mas robustas y generalmente tienen mayor densidad energética. Su profundidad de descarga puede ser hasta el total de su capacidad. Pueden ser descargas del 10 al 25% de su capacidad total en cada ciclo. La mayoría de las baterías de ciclo profundo fabricadas para

aplicaciones fotovoltaicas se diseñan para descargas de hasta 80% de su capacidad sin dañarse.

Los acumuladores de ciclo profundo están especialmente diseñados para soportar un alto número de descargas profundas y ser recargados sin afectar su desempeño, están contruidos con materiales activos de alta densidad con aditivos especiales, además de aleaciones en sus placas que cumplen con el propósito de lograr un mejor desempeño en sus ciclos de carga y descarga, con esto disminuyen el reblandecimiento y desprendimiento del material activo de las placas positivas, prolongando la vida del acumulador sometido a dichas condiciones a diferencia de los acumuladores automotrices, que al ser sometidos a condiciones de descargas profundas pierden más rápidamente su capacidad.

Con cada descarga las placas pierden algo del material activo, el que se deposita en el fondo de la caja. Cuando la superficie activa de las celdas se reduce, la vida útil de la batería disminuye. El número de ciclos que el acumulador puede entregar durante su vida útil depende del porcentaje de descarga y del modelo elegido.

Cuatro parámetros definen la selección de la batería:

1. Amperes de arranque en frio. Este valor corresponde al máximo número de amperes que la batería puede entregar, con una temperatura ambiente de -17.77°C durante 30 segundos sin bajar el voltaje por celda de 1.2 voltios.

2. Amperes de arranque. Este valor corresponde al máximo número de amperes que la batería puede entregar con una temperatura ambiente de 0°C durante 30 segundos sin bajar el voltaje por celda por debajo de 1.2 volts.

3. Nivel de reserva. Representa el tiempo en minutos, que la batería puede entregar una corriente de 25A con una temperatura ambiente de 26°C .

4. Amperes horas. Es el número de amperes que la batería puede descargar, multiplicado por el número de horas en que se entrega dicha corriente. Este parámetro determina cuanto tiempo el sistema puede operar una carga determinada sin que haya necesidad de recarga.

Todas estas características pueden o no estar en todas las especificaciones de las baterías. Además de las características de su diseño, las demandas de energía de ambos tipos de acumuladores también son diferentes ya que los acumuladores de ciclo profundo proveen cantidades relativamente bajas de corriente por largos periodos de tiempo, mientras que a un acumulador automotriz se le demandan grandes cantidades de energía por solo unos cuantos segundos, posteriormente, un alternador se encarga de recargarla y de entregar la energía al sistema eléctrico del vehículo en marcha. Un acumulador automotriz descargado de manera profunda puede perder su capacidad de uso a solo 50 ciclos o

menos, mientras que un acumulador de ciclo profundo continúa con óptimo desempeño aun después de los 300 ciclos como se muestra en la Figura 3.6. [4]

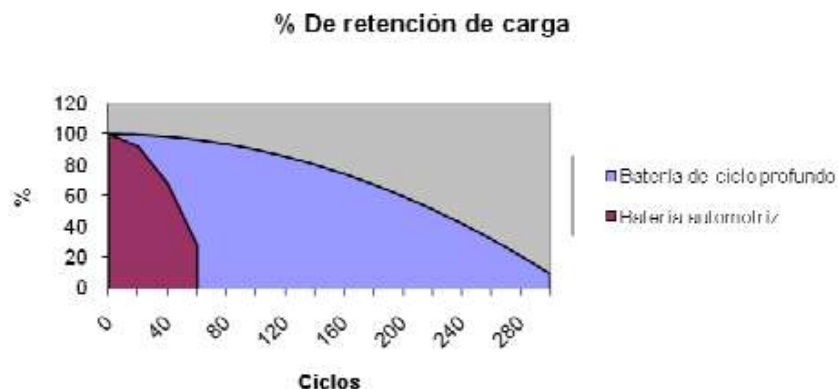


Figura 3. 6 Ciclos de baterías automotrices y de ciclo profundo.

Las baterías de ciclo profundo pueden permanecer por más tiempo en descarga e inclusive estar de esta manera por varios días, su vida útil oscila entre 300 a 1000 ciclos de carga y descarga, por tal motivo, podría cargarse y descargarse sin ningún problema durante un año y todavía funcionar por lo que a este tipo de batería se da mayor tiempo de sustitución llegando a los 3 años y medio, dependiendo la ubicación en donde esté.

Las baterías de ciclo profundo se instalan o se cambian, si su periodo de antigüedad llegó al límite, se presenta la siguiente Tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Características de la batería de ciclo profundo.

BATERÍA	VALORES
CA	700 [A]
CCA	575 [A]
RC	160 min
A-hr	95

Como el estado del clima es aleatorio, no podemos estar seguros, de qué tantos días soleados pudieran presentarse al año, sin embargo podemos estimar que las épocas de mayor incidencia podrían estar en otoño e invierno, donde el lapso de luz solar se ve reducido.

El manejo de baterías en los sistemas fotovoltaicos como en el resto del sistema merece un manejo detallado y cauteloso ya que estos acumuladores de energía dan lugar a varios riesgos de seguridad:

1. Generación de gas hidrogeno durante la carga de las baterías.

2. Corrientes de cortocircuito elevadas.
3. Electrolito ácido o caústico.
4. Posibilidad de descarga eléctrica.

En ningún caso deben colocarse en una sala de baterías o directamente sobre el banco de batería, reguladores de carga, interruptores, relés y demás dispositivos capaces de producir una chispa eléctrica para evitar cualquier posibilidad de accidente, lo cual se ilustra en la Figura 3.7.

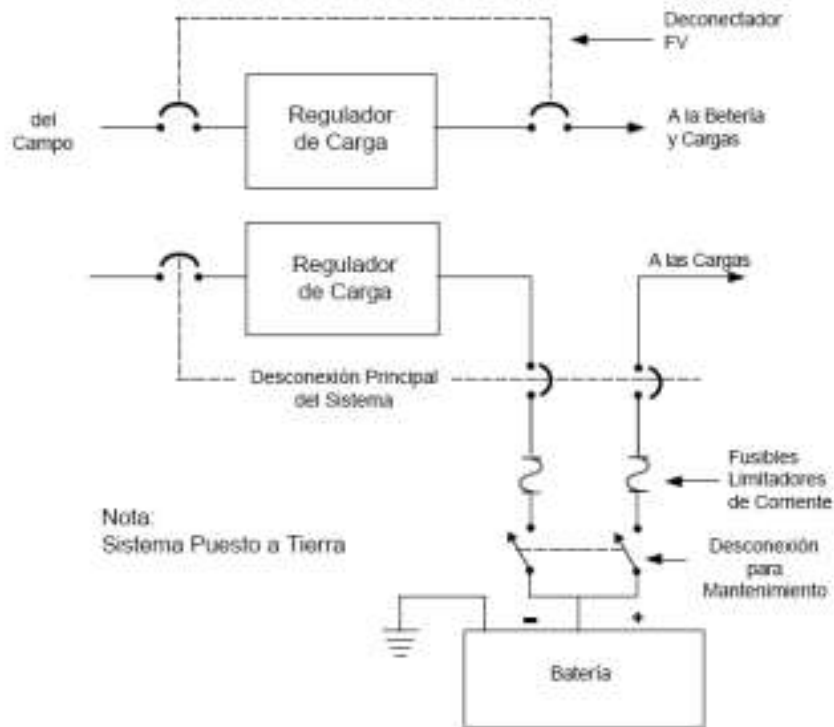


Figura 3. 7 Precaución en sistemas Fotovoltaicos

3.10 Reguladores de carga

El regulador impide la entrada o salida de corriente de la batería cuando una carga o descarga es excesiva y pueda llegar a dañarla. La mayoría de los reguladores detectan el voltaje de la batería y actúan de acuerdo con los niveles de la tensión. Los reguladores más modernos son además capaces de desconectar automáticamente los paneles durante la noche para evitar la descarga de la batería.

Los paneles fotovoltaicos actuales tienen una eficiencia promedio del 12%. Esto resultaría en la producción aproximadamente 120 W/m². Sin embargo, no todos los días son soleados por lo que el aprovechamiento efectivo es menor.

En la mayoría de los casos los periodos de luz del día no puede ser muy largo, se tiene tan solo de 4 a 6 horas efectivas de luz a la máxima potencia en la celda solar. Por lo que para ese lapso de potencia ofrecida por la celda debe ser significativo para cargar la batería por completo y dejar que en la noche esta pueda alimentar las necesidades requeridas.

Para proteger la batería de sobrecarga, el interruptor se abre cuando la tensión en la batería alcanza la tensión de corte y vuelve a cerrarse cuando la batería vuelve a la denominada tensión de rearme, la tensión de corte por alta esta en torno a 2.45V por el elemento de la batería a 25°.

En cuanto a la sobre descarga, el interruptor se abre cuando el voltaje de la batería se hace menor que la tensión de corte por baja y se cierra cuando se recupera la tensión de rearme por baja. La tensión de corte por baja esta en torno a 1.95V por elemento.

Los valores que se deben de conocer del regulador y del casco son:

- Máxima corriente que permite que circule a través de él, debe ser un 20% superior a la máxima corriente del generador fotovoltaico.
- Tensión de trabajo 12, 24 o 48V.
- Existencia de compensación con la temperatura. Las tensiones que indican el estado de carga de la batería varían con la temperatura, por eso algunos reguladores miden la temperatura y corrigen basándose en ello, las tensiones de sobrecarga.
- Instrumentación de medida e indicadores, suelen llevar un voltímetro que mida la tensión de la batería y un amperímetro que mide la corriente. La mayoría de ellos dispone de indicadores que avisan de determinadas situaciones como: bajo estado de carga de la batería, circuito de paneles desconectado de batería.

Dentro del banco de baterías en su parte superior o en lugares cercanos puede desarrollarse una fina capa de electrolito que puede causar quemaduras en el cuerpo, es conductor y en bancos grandes la tensión tan elevada puede ocasionar descargas eléctricas.

Hay reguladores de cargas que minimizan la dispersión del electrolito y el uso de agua, al tiempo que minimizan el gaseo de la batería. Para hacer esto, mantienen la tensión de la batería por debajo de la región de gaseo intenso, donde el volumen elevado de gas causa la pérdida de electrolito.

Estos reguladores de carga han de colocarse con posibilidad de ventilación. Por seguridad suelen exigirse paneles sin contactos accesibles. Un regulador de carga típico, debería colocarse en un armario homologado por UL, de forma que ninguno de sus terminales quedará accesible. Los armarios que contengan reguladores de carga deberán tener entradas para los cables y posibilitar la conexión de un tubo, cuando sea preciso. Debe quedar espacio en el interior para doblar los cables.

3.11 Clasificación de los paneles solares según los tramos de potencia eléctrica

Los paneles solares fotovoltaicos se pueden clasificar según sus tramos de potencia eléctrica en tres grupos. [4]

a) Paneles solares de 12V. Generan una tensión óptima como para cargar una batería solar que funcione con 12 voltios, esta potencia está entre los 5W y 200W y tienen 36 células, además admiten controladores de carga PWM (estos no utilizan al máximo la energía producida).

b) Paneles solares de 24V. Estos generan una tensión necesaria como para cargar una batería que trabaje a 24V, su potencia esta dentro de los 200W y los 450W y tienen 72 células, se pueden emplear con un controlador de carga MPPT o con un controlador de carga PWM.

c) Paneles de conexión a la red. Trabajan con controladores de carga MPPT, estos paneles pueden proporcionar una alta potencia a un bajo costo, los paneles constan de 60 células producen más de 200W, esta alternativa es la que se instalaba en las huertas solares en un principio.

La potencia máxima del panel solar instalada multiplicada por la radiación media diaria. Puede obtener la energía anual que es capaz de generar el panel a través de la multiplicación de estos dos conceptos, y si la divide entre 30, podrá obtener el promedio de KW mensual, al volverla a dividir entre 1000 se tendrá la cifra de kW por hora.

3.12 Sistema residencial autónomo con potencia de 3kW

Para nuestro sistema residencial autónomo fotovoltaico se tiene contemplado utilizar paneles con una potencia de 150W y 18.7V cada uno, controladores de carga con una entrada de 12 volts, baterías de ciclo profundo de 12 volts.

Se requiere generar una potencia de 3000W para ello es necesario que se instalen 20 módulos con un voltaje máximo de 18.7V y una potencia de 150W cada uno cuyas características eléctricas se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2 Especificación Eléctrica del Panel Solar.

Electrical Specifications

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Model type	GP-160P-36	GP-150P-36
Peak power (Pmax)	160W	150W
Cell Efficiency	18.81%	17.64%
Maximum power voltage (Vmp)	19.2V	18.7V
Maximum power current (Imp)	8.33A	8.02A
Open circuit voltage (Voc)	22.8V	22.3V
Short circuit current (Isc)	8.81A	8.51A
Power Tolerance	±3%	
Maximum system voltage	1000V	
Series fuse rating (A)	12	
Number of bypass diode	2	

$$\frac{3000w}{150w} = 20 \text{ paneles} \quad (3.1)$$

La conexión de los 20 paneles solares que se instalarán será en paralelo, ya que con este tipo de conexión que se utiliza sirve para aumentar la corriente total del sistema.

La salida de voltaje total del sistema sigue siendo la misma como lo haría un solo panel pero la corriente de salida se convierte en la suma de la salida de cada panel.

Mediante cableado en paralelo se conectan todas las terminales positivas juntas y todos los terminales negativos juntos hasta tener una sola conexión positiva y negativa para conectar al regulador y las baterías.

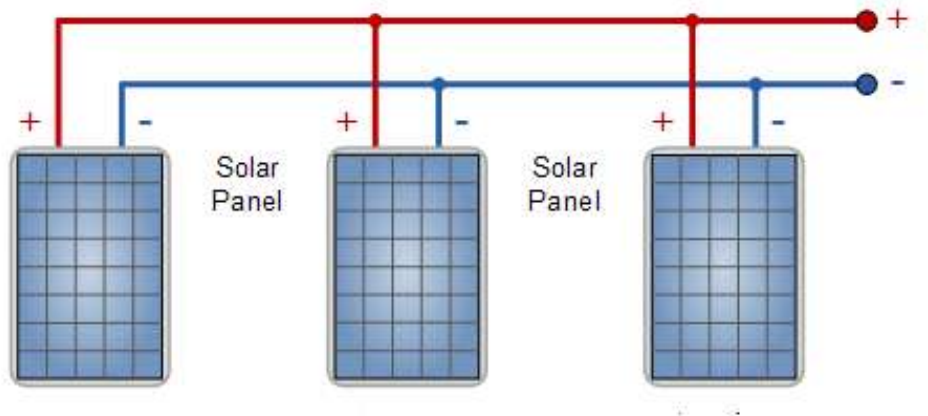


Figura 3. 8 Conexión de paneles en paralelo.

Los paneles solares que se utilizará para el diseño es el modelo GP-150P-36 este, tiene un voltaje máximo de 18.7V, todos los paneles deben de ser del mismo tipo y potencia nominal.

Conectando 20 paneles en paralelo se tendrá un voltaje de salida que permanecerá de 18.7V y una corriente de pico máxima de 160.4 A $I = 20 * 8.02A = 160.4A$, con este arreglo de paneles en paralelo se tendrá una potencia máxima de 3000W.

Para la instalación eléctrica de los paneles es necesario hacer los siguientes cálculos:

La corriente de corto circuito de cada panel es de 8.51A, si la corriente máxima en los conductores debe de ser del 125% de la corriente de cortocircuito, entonces $1.25 * 8.5 A = 10.6 A$ y para todo el sistema con los 20 paneles solares se tendrá una corriente máxima en los conductores de $20 * 10.6 = 212A$.

Si tomamos en consideración que los paneles solares tienen como dimensiones aproximadas de 1.480 x 0.670 x 35 mm, por lo tanto, cada panel ocuparía un área de $0.9916m^2$, por lo que los 20 paneles ocuparían un área de $19.832m^2$, que serán colocadas en la azotea de la casa ya que es un lugar con mayor recepción de los rayos del Sol.

Además es un lugar más seguro donde no pueda ser robado, ni dañado o manipulado por terceras personas, la ubicación del panel permitirá instalar los otros componentes del sistema en un lugar seguro y seco dentro de la vivienda.

Los espacios deben de ser de fácil acceso para el mantenimiento y tiene que ser visibles para los habitantes de la casa.

CAPÍTULO 4

Diseño de convertidores

4.1 Introducción

El incremento en el uso de aparatos portátiles como teléfonos celulares, computadora, sistemas de diagnóstico médico, entre muchos otros, se requieren sistemas de manejo de potencia más eficiente y en ocasiones son necesarios diferentes niveles de voltaje de CD para operar varios circuitos electrónicos contruidos con diferentes tecnologías contenidos en este tipo de aparatos, por lo que los convertidores de CD-CD juegan un papel importante para el mantenimiento de larga vida de baterías, sin dejar de ofrecer tensiones de alimentación estables junto con la capacidad de conducción requerida.

En muchas aplicaciones industriales es necesario el convertir una fuente de poder de corriente directa de voltaje fijo a una fuente de CD de voltaje variable. Un convertidor de CD convierte directamente de CD-CD y se llama simplemente convertidor de CD. Se puede considerar que un convertidor de CD es el equivalente en CD a un transformador de corriente alterna, con una relación de vueltas que varía en forma continua. Al igual que un transformador puede utilizarse como una fuente de CD reductora o elevadora de voltaje. [3]

Los convertidores de CD-CD reciben este nombre, porque en su realización se emplean dispositivos electrónicos que trabajan en conmutación. Se logra de esta forma que la energía disipada sea teóricamente nula, debido a que los dispositivos soportan voltaje sin dejar pasar corriente durante el estado de corte y dejan pasar corriente sin soportar voltaje durante el estado de conducción. En la práctica la disipación no es nula, debido principalmente a que en los componentes coexisten voltajes y corrientes apreciables durante las transiciones de un estado a otro.

Cuando estos convertidores se utilizan en aplicaciones en las que el nivel de potencia manejado es bajo, el elemento semiconductor principal es un transistor. Se suelen utilizar transistores bipolares para potencias de varios kW, con una frecuencia de conmutación

inferior a 50 kHz, y transistores MOS para potencias máximas de unos pocos kW, con una frecuencia de trabajo superior a los 50KHz. En la actualidad se utilizan también IGBTs, en un rango intermedio entre el de los bipolares y los MOSFETs, por sus características híbridas entre ambos.

Una de las aplicaciones fundamentales de los convertidores de CD-CD con transistores las constituyen las fuentes de alimentación conmutadas. Para dar una idea de su importancia, en la Tabla 4.1 se muestran datos estimados de la evolución del mercado de fuentes de alimentación en Estados Unidos y la inversión que este país realiza en este campo. Otro campo de aplicación es la realización de reguladores de alta frecuencia.

Tabla 4. 1 Volumen de mercado de fuentes lineales contra fuentes conmutadas.

Año	Dólares (Miles de millones)	Mercado(%)	
		Lineales	Conmutadas
1980	2.4	75	25
1986	4.5	40	60
1990	7	20	80
2000	15	10	90

Los convertidores de CD-CD conmutados se pueden dividir en dos grandes categorías, de acuerdo con su principio de funcionamiento:

- Controlados mediante PWM.
- Resonantes.

A su vez en cada una de estas categorías se pueden clasificar los convertidores atendiendo a su topología, es decir a la forma en la que se interconectan los elementos pasivos y los interruptores. La clasificación general de los convertidores de CD-CD conmutados se muestra en la Figura 4.1.

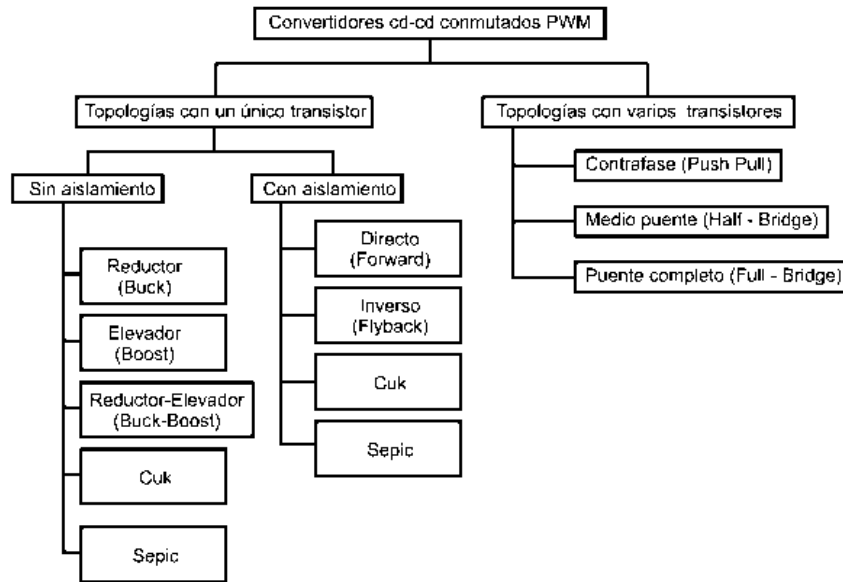


Figura 4. 1 Clasificación de los convertidores de CD-CD conmutados PWM.

Los convertidores de CD-CD se utilizan ampliamente en el control de motores de tracción de automóviles eléctricos, tranvías eléctricos, grúas marinas, montacargas y elevadores de minas. Se puede usar en el frenado regenerativo de motores de CD para regresar la energía a la fuente. Los convertidores de CD se usan en los reguladores de voltaje de CD y también se usan en conjunto con un inductor para generar una corriente de CD. Se analizarán los convertidores de CD-CD las cuales son: elevadora, reductora, elevador reductor, Cuk y Flyback.

4.2 Topología básica con un único interruptor controlado

Su funcionamiento se basa en la conmutación de dos dispositivos, un transistor con su circuito de control correspondiente y un diodo cuyo estado depende del que tiene el transistor. En el estudio de un convertidor de CD-CD conmutado PWM, en el que el interruptor controlado se abre y se cierra periódicamente, se denomina t_{ON} al tiempo durante el cual está cerrado y t_{OFF} al tiempo durante el cual está abierto. Se define el ciclo de trabajo (d) como la fracción del periodo durante el cual el interruptor está cerrado por lo que se cumple que:

$$d = \frac{t_{ON}}{T} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}, \quad t_{ON} = d * T, \quad t_{OFF} = (1 - d)T \quad (4.1)$$

Se estudia el comportamiento estático de cada topología para determinar sus parámetros fundamentales, que son:

- La relación entre el voltaje de salida y de entrada o relación de transformación.
- Los voltajes máximos y las corrientes máximas y medias soportadas por los distintos componentes y, en particular, por los dispositivos semiconductores.
- El rizado del voltaje de salida.

Para calcular la relación entre las distintas variables eléctricas se tiene en cuenta el comportamiento de los inductores y de los capacitores en régimen permanente Figura 4.2.

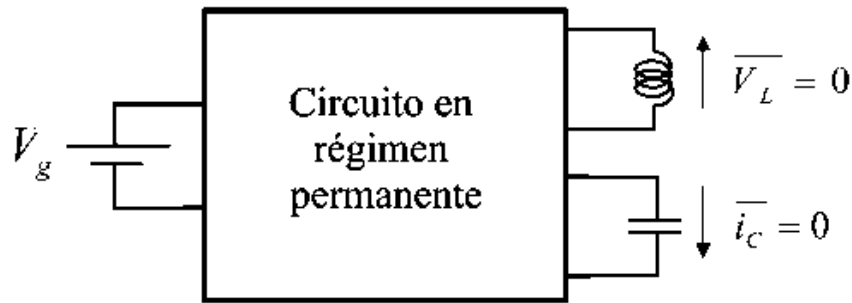


Figura 4. 2 Inductores y capacitores en régimen permanente.

En el caso del cálculo de la relación de transformación se tiene en cuenta las formas de onda en el inductor Figura 4.3.

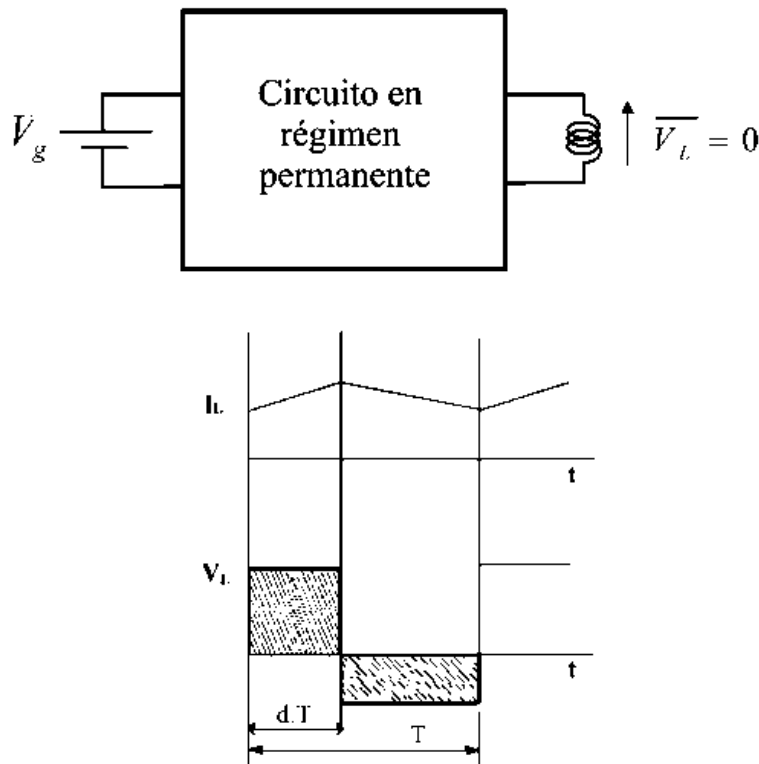


Figura 4. 3 Formas de onda en el inductor.

Se realiza en dos posibles modos de funcionamiento:

- a) Modo de conducción continuo, en el que la corriente que circula a través del inductor no se anula en ningún momento del periodo de conmutación.
- b) Modo de conducción discontinuo, en el que la corriente que circula a través del inductor se anula antes del fin del periodo de conmutación.

El modo de conducción del convertidor es debido a que el valor medio de la corriente a través del inductor i_L depende del valor de la corriente de salida i_o . En la Figura 4.4, se muestra la relación entre ambos valores cuando se incrementa la resistencia de carga. Teniendo en cuenta que las pendientes de las corrientes i_L no dependen de la corriente de salida sino del voltaje de entrada V_s y del voltaje de salida V_o , a medida que disminuye la corriente de salida el valor mínimo de la corriente por el inductor tiende a cero.

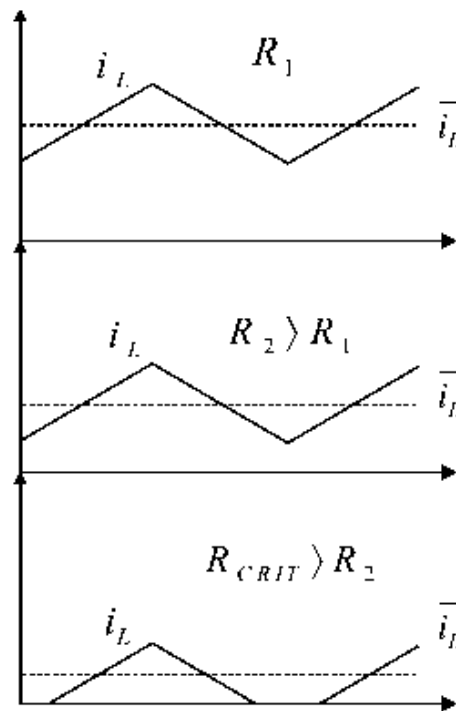


Figura 4. 4 Relación entre la corriente de salida y el valor medio de la misma.

¿Qué ocurre cuando la resistencia de carga es mayor que el valor de la resistencia crítica? Si el convertidor es bidireccional seguirá funcionando en modo continuo pero, en caso contrario estaría en modo de funcionamiento discontinuo Figura 4.5.

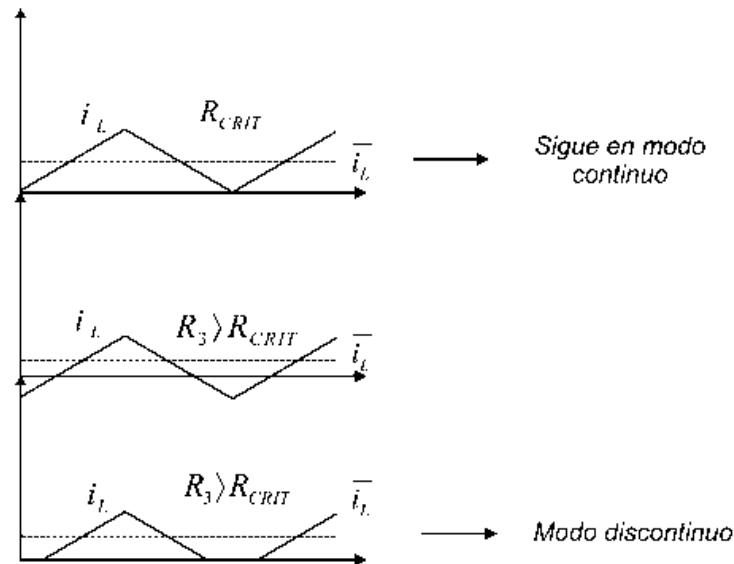


Figura 4. 5 Modo de funcionamiento continuo y discontinuo.

Cuando se trabaja en modo discontinuo no existe parte negativa por lo que el valor medio de la corriente a través del inductor se incrementa y como consecuencia también lo harán la corriente y el voltaje de salida. En la Figura 4.6 se muestra el acercamiento a la situación crítica debido a la influencia de la inductancia, de la frecuencia de funcionamiento y del valor de la resistencia de carga.

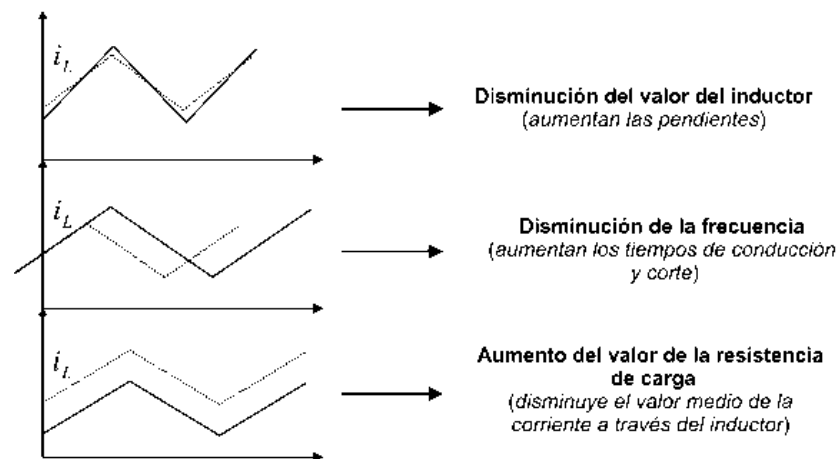


Figura 4. 6 Parámetros que influyen en el modo de funcionamiento.

El análisis de las topologías abordadas aquí, en ambos modos de conducción, se lleva a cabo de forma simplificada, a partir de un conjunto de aproximaciones, comunes para todas ellas:

- El voltaje de entrada es constante
- Los dispositivos son ideales por lo que su conmutación es instantánea y no hay disipación de potencia en el convertidor.
- El circuito de control mantiene constante el periodo de conmutación.
- El valor del capacitor es suficientemente grande para que se pueda considerar el voltaje en la carga constante.
- Los valores de los voltajes y corrientes máximas y de la relación de transformación se calculan suponiendo ciertas condiciones iniciales en todos los elementos reactivos.

A continuación se estudian las topologías básicas de convertidores de CD-CD sin aislamiento galvánico y con aislamiento galvánico, conmutadas PWM que poseen un único interruptor controlado. Dichas topologías son las siguientes:

- Convertidor reductor.
- Convertidor elevador.
- Convertidor elevador-reductor.
- Convertidor Cuk.
- Y con aislamiento galvánico el convertidor Flyback.

4.3 El convertidor reductor (buck)

En algunas aplicaciones puede ser suficiente controlar la componente continua de una salida de pulsos mostrada en la Figura 4.7c pero muchas veces el objetivo es producir una salida que sea continua pura. Una manera de obtener una salida en el circuito de la figura 4.7a es insertar un filtro paso bajo después del interruptor. En la Figura 4.8a. Se muestra un filtro pasa bajo con una bobina y un condensador añadido al convertidor básico. El diodo proporciona un camino a la corriente de la bobina cuando el interruptor está abierto y se polariza en inversa cuando el interruptor está cerrado. Este circuito se denomina convertidor o convertidor reductor, porque la tensión de salida es menor que la de entrada. [1]

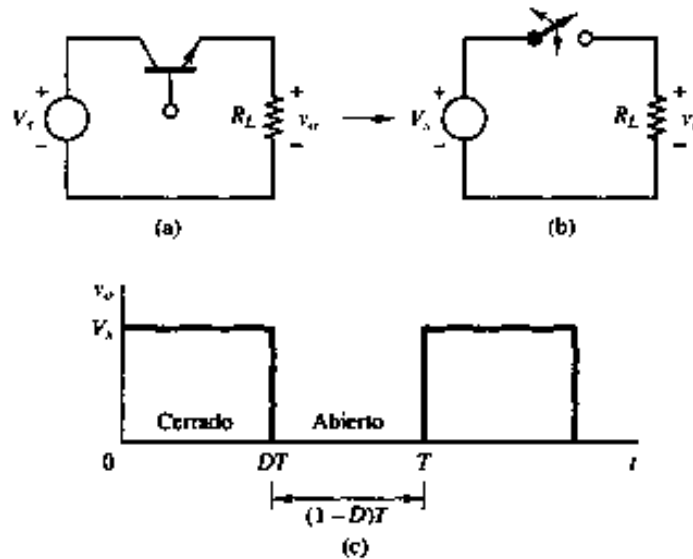


Figura 4. 7 Conmutador CD-CD básico conmutado.

4.3.1 Relaciones entre la tensión y la corriente

Si el filtro pasa bajo es ideal la tensión de salida es la media de la tensión de entrada del filtro. La entrada del filtro en la Figura 4.8a es V_s cuando el interruptor está cerrado y cero cuando el interruptor está abierto, siempre que la corriente en la bobina sea positiva y el diodo conduzca. Si el interruptor se cierra de forma periódica con un ciclo de trabajo D , la tensión media en la entrada del filtro es $V_o = V_s D$.

Para este análisis se supondrá que el diodo está polarizado en directa siempre que el interruptor esté abierto y que la corriente en la bobina es positiva. Una corriente en la bobina que sea positiva en todo el intervalo de conmutación se denomina corriente permanente. Por el contrario, la corriente discontinua se caracteriza porque la corriente de la bobina pasa por cero en cada periodo.

Otra forma de analizar el funcionamiento del convertidor reductor de la Figura 4.8a es examinar la tensión y la corriente de la bobina.

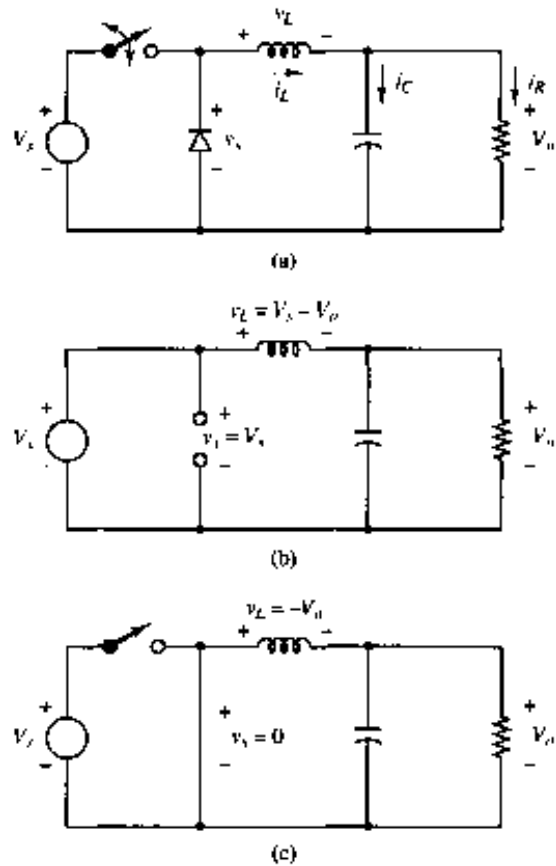


Figura 4. 8 Convertidor CD-CD reductor.

Se enumeran las propiedades del convertidor reductor cuando funcionan en régimen permanente.

La corriente de la bobina es periódica

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (4.2)$$

La tensión media en la bobina es cero

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (4.3)$$

La corriente media en el condensador es cero

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0 \quad (4.4)$$

La potencia entregada por la fuente es igual a la suministrada a la carga, Cuando los componentes no son ideales, la fuente también suministra las pérdidas.

$$\begin{aligned}
 P_s &= P_o \quad (\text{ideal}) \\
 P_s &= P_o + \text{p\u00e9rdidas} \quad (\text{no ideal})
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Para analizar el convertidor reductor en la Figura 4.8a suponemos que:

1. El circuito opera en r\u00e9gimen permanente.
2. La corriente en la bobina es permanente.
3. El valor del condensado es muy grande y la tensi\u00f3n de salida se mantiene constante a una tensi\u00f3n V_o .
4. El periodo de conmutaci\u00f3n es T , el interruptor est\u00e1 cerrado en un tiempo DT y estar\u00e1 abierto el resto del tiempo $(1-D)T$.
5. Los componentes son ideales.

Para determinar la salida V_o es examinar en primer lugar, la corriente y la tensi\u00f3n en la bobina cuando el interruptor est\u00e1 cerrado y luego con el interruptor abierto. La variaci\u00f3n neta de corriente en la bobina en un periodo debe ser cero en r\u00e9gimen permanente, la tensi\u00f3n media en la bobina es cero.

4.3.2 An\u00e1lisis con el interruptor cerrado

Cuando el interruptor est\u00e1 cerrado como se muestra en la Figura 4.8a, el diodo se polariza en inversa y el circuito equivalente es como se muestra en la Figura 4.8b La tensi\u00f3n en la bobina es $V_L = V_s - V_o$.

Reorganizando los t\u00e9rminos obtenemos,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (\text{conmutador cerrado})
 \tag{4.6}$$

Como la derivada de la corriente es una constante positiva, la corriente aumenta linealmente como se muestra en la Figura 4.9b. La variaci\u00f3n de corriente cuando el interruptor est\u00e1 cerrado se calcula.

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT
 \tag{4.7}$$

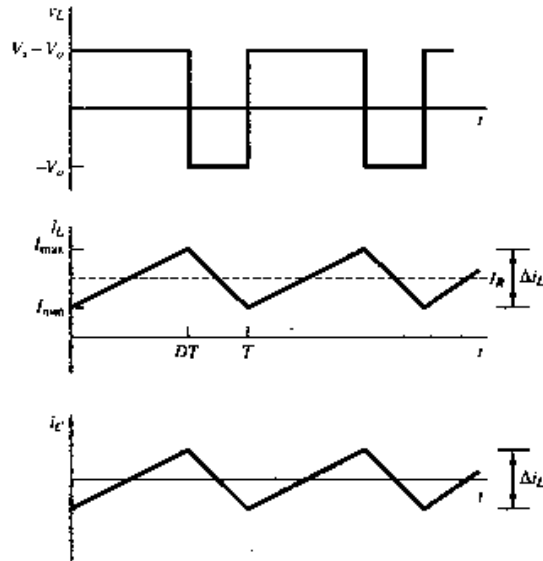


Figura 4. 9 a) Tensión en la bobina, b) Corriente en la bobina, c) Corriente del condensador.

4.3.3 Análisis con el interruptor abierto

Cuando el interruptor está abierto, el diodo se polariza en directa para dejar pasar la corriente de la bobina y se aplica el circuito equivalente de la Figura 4.8c. Cuando el interruptor está abierto, la tensión en la bobina es $V_L = -V_o$.

Reorganizando los términos se obtiene

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (\text{interruptor abierto}) \quad (4.8)$$

La derivada de la corriente en la bobina es una constante negativa y la corriente disminuye linealmente como se muestra en la Figura 4.9b. La variación de la corriente en la bobina cuando el interruptor está abierto es,

$$(\Delta i_L)_{\text{abierto}} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T \quad (4.9)$$

En la operación en régimen permanente es necesario que la corriente de la bobina sea la misma al final y al principio de cada ciclo de conmutación, por lo que la variación neta de la corriente de la bobina en un periodo será cero. Para ello se debe cumplir

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} + (\Delta i_L)_{\text{abierto}} = 0 \quad (4.10)$$

Utilizando las ecuaciones 4.7 y 4.9:

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T = 0 \quad (4.11)$$

Despejando V_o

$$V_o = V_s D \quad (4.12)$$

El convertidor reductor produce una salida menor o igual a la entrada.

Una forma alternativa de calcular la tensión de salida se basa en la tensión de la bobina como se muestra en la Figura 4.9a. Dado que la tensión media en la bobina es cero en régimen permanente.

$$V_L = (V_s - V_o)DT + (-V_o)(1 - D)T = 0 \quad (4.13)$$

Al despejar V_o de la Ecuación 4.13, se obtiene el mismo resultado que utilizando la ecuación 4.12

$$V_o = V_s D$$

Observe que la tensión de salida solo depende de la entrada y del ciclo de trabajo D . Si la tensión de entrada fluctúa, la tensión de salida puede regularse ajustando el ciclo de trabajo adecuadamente. Se precisa un bucle de realimentación para muestrear la tensión de salida, compararla con una referencia y configurar correctamente el ciclo de trabajo del conmutador.

La corriente media en la bobina debe ser igual a la corriente media en la resistencia de carga, porque la corriente media en el condensador debe ser nula cuando opera en régimen permanente.

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad (4.14)$$

Los valores máximos y mínimo de la corriente en la bobina se calcularán de la siguiente manera:

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1 - D)T \right] = V_o \left[\frac{1}{R} + \frac{(1 - D)}{2Lf} \right] \quad (4.15)$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1 - D)T \right] = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1 - D)}{2Lf} \right] \quad (4.16)$$

Siendo $f=1/T$ la frecuencia de conmutación en hercios.

Para que el análisis anterior sea válido, es necesario verificar que existe corriente permanente en la bobina. Una forma sencilla de hacer esta comprobación es calcular la corriente mínima en la bobina utilizando la ecuación 4.16.

Como el valor mínimo de la corriente en la bobina debe ser positivo para tener una corriente permanente, no está permitido que el valor mínimo calculado sea negativo, debido al diodo y dicha situación indicaría que la corriente es discontinua. El circuito funcionará con corriente discontinua en la bobina pero el análisis anterior no será válido.

Podemos utilizar la ecuación anterior para determinar la combinación de L y f que producirá corriente permanente. Como la corriente mínimo es igual a cero, es el límite entre la corriente permanente y la corriente discontinua.

$$I_{\min} = 0 = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (Lf)_{\min} = \frac{(1-D)R}{2} \quad (4.17)$$

Se fija la frecuencia de conmutación deseada

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (4.18)$$

Siendo $L_{\min}$ la inductancia mínima necesaria para que exista corriente permanente.

4.3.4 Rizado de la tensión de salida

En el análisis anterior se obtuvo que el condensador era muy grande para que la tensión de salida fuese constante. En la práctica no será posible mantener perfectamente constante la tensión de salida con una capacidad finita. La variación periódica de la tensión de salida o rizado, se calcula a partir de la relación entre la tensión y la corriente del condensador. La corriente en el condensador es

$$i_C = i_L - i_R \quad (4.19)$$

Dicha corriente se encuentra en la Figura 4.10.

El condensador se cargará mientras sea positiva la corriente en el mismo. Aplicando la definición de capacidad.

$$\begin{aligned}
 Q &= CV_o \\
 \Delta Q &= C\Delta V_o \\
 \Delta V_o &= \frac{\Delta Q}{C}
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

La variación de la carga ΔQ , es el área del triángulo situado por encima del eje de tiempos:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8}
 \tag{4.21}$$

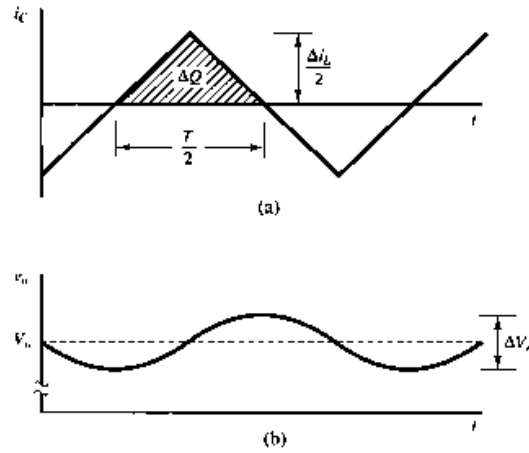


Figura 4. 10 a) Corriente en el condensador, b) Tensión de rizado en el condensador.

Con lo que obtenemos,

$$\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C}
 \tag{4.22}$$

Sustituyendo el valor de Δi_L dado por la ecuación 4.9,

$$(\Delta i_L)_{\text{obtenido}} = - \left(\frac{V_o}{L} \right) (1 - D)T$$

Tenemos:

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1 - D)T = \frac{V_o(1 - D)}{8LCf^2}
 \tag{4.23}$$

En esta ecuación ΔV_o es la tensión de rizado pico a pico en la salida, mostrada en la Figura 4.10b. También es útil expresar el rizado como una fracción de la tensión de salida.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (4.24)$$

Si el rizado no es muy grande, la suposición de que la salida es constante es razonable y el análisis anterior será válido. Dado que suponemos que los componentes del convertidor son ideales, la potencia entregada por el generador debe ser igual a la potencia absorbida por la resistencia de carga.

$$\begin{aligned} P_s &= P_o \\ V_s I_s &= V_o I_o \\ \frac{V_o}{V_s} &= \frac{I_s}{I_o} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Se observa que la relación anterior es similar a la relación tensión- corriente de un transformador en las aplicaciones de alterna. Por tanto el circuito convertidor reductor es equivalente a un transformador de continua.

4.3.5 Análisis en modo de conducción discontinuo

En este modo de funcionamiento el convertidor pasa por tres estados en cada periodo de conmutación, dos de ellos son idénticos a los estudiados en el modo de conducción continuo y el tercero cuyo circuito equivalente se muestra en la Figura 4.11, corresponde al intervalo durante el cual el interruptor está abierto y la corriente a través del inductor se anula.

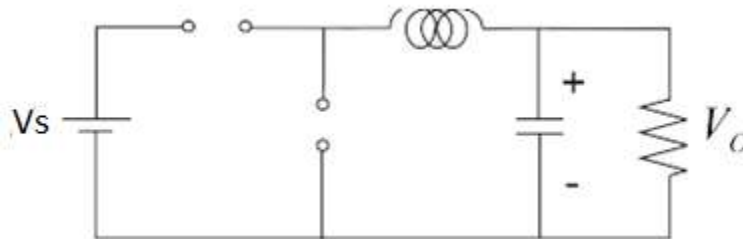


Figura 4. 11 Modo de conducción discontinuo para el convertidor reductor.

Para el análisis, se siguen razonamientos análogos a los utilizados en el caso del modo de conducción continuo.

4.3.6 Consideraciones de diseño

La mayoría de los convertidores reductores están diseñados para funcionamiento con corriente permanente, observe que al aumentar la frecuencia de conmutación, se reduce

el tamaño mínimo necesario de la bobina para producir corriente permanente y el tamaño mínimo del condensador para limitar el rizado de salida. Por tanto, las frecuencias de conmutación altas permiten reducir el tamaño de la bobina y del condensador. Las desventajas que presentan las altas frecuencias de conmutación es un aumento de la pérdida de potencia en los interruptores, al aumentar la pérdida de potencia en los conmutadores disminuye la eficiencia del convertidor y será necesario utilizar un disipador de calor de mayor tamaño para el transistor que funciona como interruptor, lo que compensa la ventaja de reducir el tamaño de la bobina y el condensador. Las frecuencias típicas de conmutación varían en el rango comprendido entre 20kHz y 50kHz. A medida que mejoren los dispositivos interruptores aumentaran las frecuencias de conmutación.

Los valores nominales del hilo de la bobina deben poder tolerar la corriente eficaz y el núcleo no deberá saturarse para la corriente de pico de la bobina, debe seleccionarse un condensador para limitar el rizado de la salida en función de las especificaciones de diseño, de manera que soporte la tensión de pico de salida y conduzca la corriente eficaz necesaria. El interruptor y el diodo deben soportar la tensión máxima cuando estén desactivados y la corriente máxima cuando estén activados. No deben superarse los valores nominales de temperatura, por lo que posiblemente será necesario utilizar un disipador de calor. [1]

4.4 Convertidor elevador (boost)

En la Figura 4.12 se muestra el convertidor elevador. Este es otro convertidor conmutado que funciona abriendo y cerrando periódicamente el interruptor electrónico. Se denomina convertidor elevador porque la tensión de salida es mayor a la tensión de entrada.

4.4.1 Relaciones entre tensión y la corriente

En el análisis de circuito se hacen las siguientes suposiciones:

1. El circuito opera en régimen permanente.
2. El periodo de conmutación es T y el interruptor está cerrado n tiempo DT y está abierto el resto del tiempo $(1-D) T$.
3. La corriente en la bobina es permanente.
4. El condensador es muy grande y la tensión de salida se mantiene constante y su valor es V_o .
5. Los componentes son ideales.

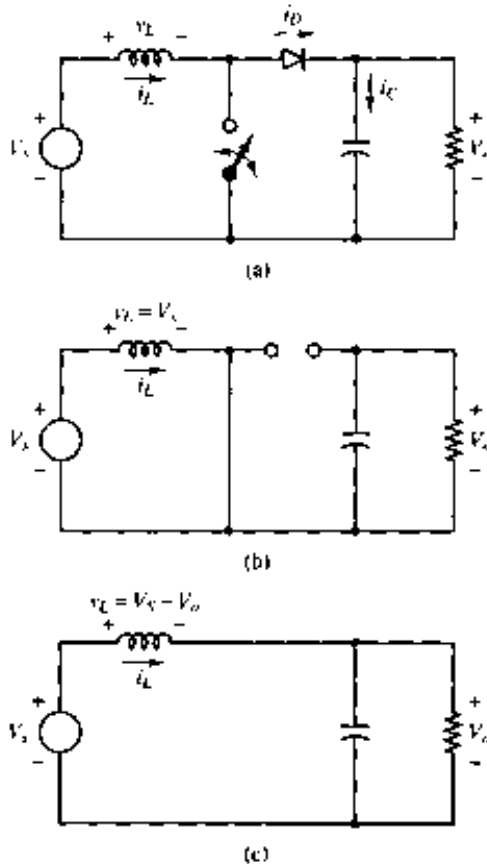


Figura 4. 12 El convertidor elevador.

Se analizará la tensión y la corriente en la bobina con el interruptor cerrado y con el interruptor abierto.

4.4.2 Análisis con el interruptor cerrado

Cuando el interruptor está cerrado, el diodo está polarizado en inversa. La ley de Kirchhoff para las tensiones en la malla que incluye la fuente, la bobina y el interruptor cerrado es

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{o} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (4.26)$$

El ritmo de variación de la corriente es constante, por lo que la corriente aumenta linealmente cuando el interruptor está cerrado, como se muestra en la Figura 4.13b. La variación de corriente en la bobina se calcula utilizando,

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (4.27)$$

Despejando Δi_L cuando el interruptor está cerrado

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_s DT}{L} \quad (4.28)$$

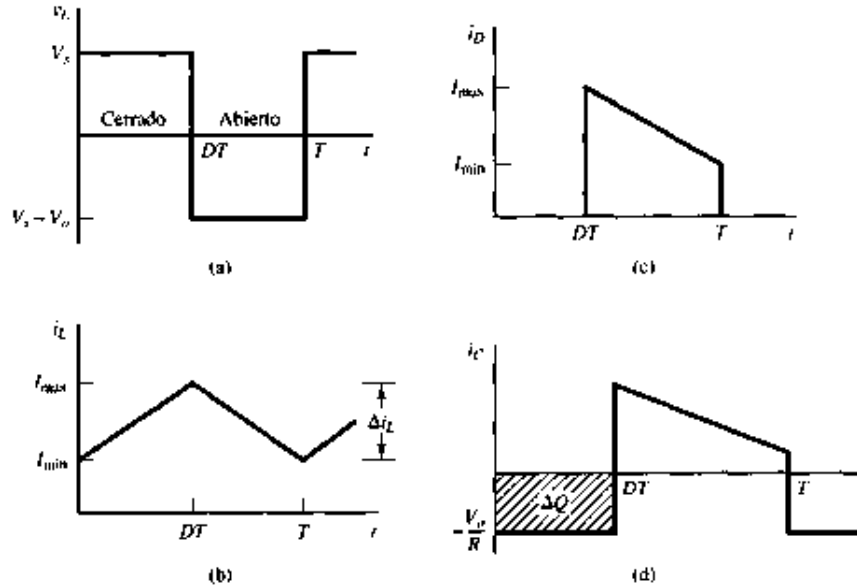


Figura 4. 13 Formas de onda del convertidor elevador.

4.4.3 Análisis con el interruptor abierto

Cando el interruptor está abierto, la corriente en la bobina no puede variar de forma instantánea, por lo que el diodo se polariza en directa para proporcionar un camino a la corriente en la bobina. Suponiendo que la tensión de salida V_o es constante, la tensión en la bobina es,

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.29)$$

El ritmo de variación de corriente en la bobina es una constante, por lo que la corriente debe variar linealmente cuando el interruptor este abierto. La variación en la corriente de la bobina con el interruptor abierto es:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (4.30)$$

Despejando Δi_L

$$(\Delta i_L)_{abierto} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} \quad (4.31)$$

En régimen permanente, la variación neta de la corriente de la bobina debe ser igual a cero. Obtenemos que,

$$(\Delta i_L)_{cerrado} + (\Delta i_L)_{abierto} = 0$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0$$

Despejando V_o obtenemos,

$$V_s(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0$$

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (4.32)$$

Además, la tensión media en la bobina debe ser cero cuando el convertidor opere en régimen permanente. La expresión de la tensión media en la bobina en un periodo de conmutación es:

$$V_L = V_s D + (V_s - V_o)(1 - D) = 0 \quad (4.33)$$

Al calcular V_o se obtuvo el mismo resultado que el obtenido utilizando la Ecuación 4.32. Si el interruptor siempre está abierto y D es cero, la salida es igual a la entrada. Al aumentar el ciclo de trabajo, el denominador de la Ecuación 4.32 disminuirá y la salida será mayor que la entrada. El convertidor elevador produce una tensión de salida mayor o igual a la tensión de entrada. Sin embargo, la salida no puede ser menor que la entrada, como sucedía con el convertidor reductor.

Cuando el ciclo de trabajo del interruptor se aproxime a la unidad, la salida se hará infinita. Los componentes reales, que producen pérdidas, impedirán que la salida se haga infinita. En la figura 4.13 se muestran las formas de onda de la tensión y la corriente del convertidor elevador.

La corriente media en la bobina se calculará teniendo en cuenta que la potencia entregada por la fuente debe de ser igual a la potencia absorbida por la resistencia de carga. La potencia de salida es:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (4.34)$$

Y la potencia de entrada es $V_s I_s = V_s I_L$ igualando la potencia de entrada y la potencia de salida se tiene que:

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2 R} \quad (4.35)$$

$$\boxed{I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R}} \quad (4.36)$$

La corriente máxima y mínima en la bobina se determina utilizando el valor medio y la variación de corriente dada por:

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s D T}{2L} \quad (4.37)$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L} \quad (4.38)$$

Se ha desarrollado suponiendo que la corriente en la bobina era permanente y siempre positiva. Para que la corriente en la bobina sea permanente es necesario que $I_{\min}$ sea positiva. Por tanto, el límite entre las corrientes permanente y discontinua en la bobina se calcula utilizando:

$$I_{\min} = 0 = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L}$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{V_s D T}{2L} = \frac{V_s D}{2Lf}$$

Por tanto, la combinación mínima de inductancia y frecuencia de conmutación para obtener corriente permanente en el convertidor elevador será:

$$(Lf)_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2} \quad (4.39)$$

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (4.40)$$

4.4.4 Rizado de la tensión de salida

Las ecuaciones anteriores se han desarrollado suponiendo que la tensión de salida era constante y por tanto, que la capacidad era infinita. En la práctica, una capacidad finita producirá una pequeña fluctuación o rizado en la tensión de salida.

El rizado pico a pico de la tensión de salida puede calcularse a partir de la forma de onda de la corriente en el condensador mostrada en la Figura 4.13d. La variación de la carga del condensador puede calcularse utilizando

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT = C \Delta V_o \quad (4.41)$$

Por tanto, la expresión del rizado es:

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} = \frac{V_o D}{RCf} \quad (4.42)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (4.43)$$

Siendo f la frecuencia de conmutación en hercios.

4.5 Convertidor Reductor-Elevador (buck-boost)

Otro convertidor básico en modo conmutado es el convertidor reductor-Elevador que se muestra en la Figura 4.14 La salida del convertidor reductor-elevador puede ser mayor o menor que la tensión de entrada.

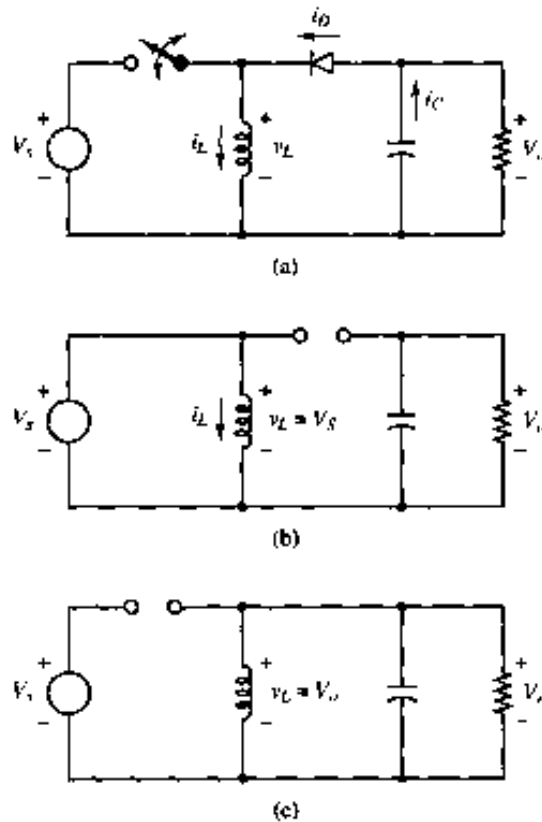


Figura 4. 14 convertidor reductor-elevador.

4.5.1 Relaciones entre la tensión y la corriente

Se realizan las siguientes suposiciones acerca del modo de operación del convertidor

1. El circuito opera en régimen permanente.
2. La corriente en la bobina es permanente.
3. El condensador es lo suficientemente grande como para suponer una tensión de salida constante.
4. El interruptor está cerrado un tiempo DT y está abierto el resto del tiempo $(1-D)T$.
5. Los componentes son ideales.

4.5.2 Análisis con el interruptor cerrado

Cuando el interruptor está cerrado, la tensión en la bobina es,

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es una constante, por lo que la corriente en la misma aumenta linealmente. Podemos expresar la ecuación anterior de la siguiente manera

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L}$$

Calculando Δi_L con el interruptor cerrado obtenemos la Ecuación 4.28

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_s DT}{L}$$

4.5.3 Análisis con el interruptor abierto

Cuando el interruptor está abierto, la corriente en la bobina no puede variar instantáneamente, por lo que el diodo está polarizado en directa y pasará corriente por la resistencia y el condensador. Cuando se da esta condición, la tensión en la bobina es:

$$v_L = V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (4.44)$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es de nuevo constante, y la variación de la corriente es:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_o}{L} \quad (4.45)$$

Resolviendo para obtener Δi_L ,

$$(\Delta i_L)_{\text{abierto}} = \frac{V_o(1-D)T}{L} \quad (4.46)$$

Cuando el circuito funciona en régimen permanente, la variación neta de la corriente en la bobina debe ser nula en un periodo. Utilizando las ecuaciones anteriores obtenemos:

$$\begin{aligned} (\Delta i_L)_{\text{cerrado}} + (\Delta i_L)_{\text{abierto}} &= 0 \\ \frac{V_s DT}{L} + \frac{V_o(1-D)T}{L} &= 0 \end{aligned} \quad (4.47)$$

Resolviendo para obtener V_o

$$V_o = -V_s \left[\frac{D}{1-D} \right] \quad (4.48)$$

La tensión media en la bobina es cero cuando el convertidor opera en régimen permanente, por lo que

$$V_L = V_s D + V_o(1 - D) = 0 \quad (4.49)$$

Al calcular V_o se obtiene el mismo resultado que la Ecuación 4.49 donde muestra que la polaridad de la tensión de salida es opuesta a la de la tensión de la fuente. La magnitud de salida del convertidor reductor-elevador puede ser menor o mayor que la de la fuente, en función del ciclo de trabajo del interruptor. Si $D > 0.5$ la salida será mayor que la entrada, y si $D < 0.5$ la salida será menor que la entrada. Por tanto, este circuito combina las características de los convertidores reductor y elevador. Sin embargo la inversión de la polaridad en la salida puede ser una desventaja para algunas aplicaciones. En la Figura 4.15 se muestran las formas de onda de tensión y corriente.

Obsérvese que, en el convertidor reductor-elevador, la fuente nunca se conecta directamente a la carga. La energía se almacena en la bobina cuando el interruptor está cerrado y se entrega a la carga cuando está abierto. Por tanto, el convertidor reductor-elevador también se denomina convertidor indirecto.

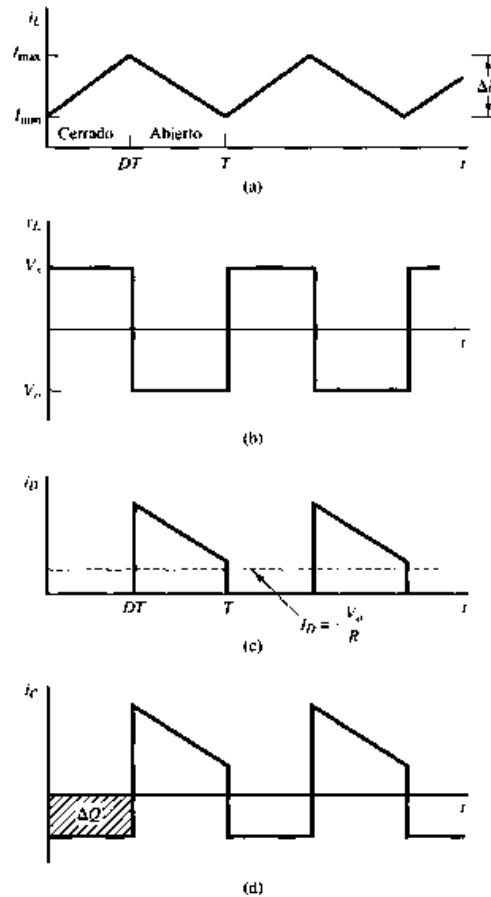


Figura 4. 15 Formas de onda del convertidor reductor-elevador.

La potencia absorbida por la carga debe ser igual a la entregada por la fuente, siendo

$$\begin{aligned}
 P_o &= \frac{V_o^2}{R} \\
 P_s &= V_s I_s \\
 \frac{V_o^2}{R} &= V_s I_s
 \end{aligned}
 \tag{4.50}$$

La corriente media de la fuente se selecciona con la corriente media en la bobina del siguiente modo

$$I_s = I_L D \tag{4.51}$$

Con lo que se obtiene

$$\frac{V_o^2}{R} = V_s I_L D \tag{4.52}$$

Sustituyendo la Ecuación 4.48 y despejando I_L se obtiene

$$I_L = \frac{V_o^2}{V_s R D} = \frac{P_o}{V_s D} = \frac{V_s D}{R(1-D)^2} \tag{4.53}$$

Hallaremos la corriente máxima y mínima utilizando las ecuaciones 4.28 y 4.53

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_s D}{R(1-D)^2} + \frac{V_s D T}{2L} \tag{4.54}$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_s D}{R(1-D)^2} - \frac{V_s D T}{2L} \tag{4.55}$$

La corriente en la bobina debe ser positiva para tener corriente permanente. Igualaremos corriente mínima a cero para determinar el límite entre la corriente permanente y la corriente discontinua.

$$\begin{aligned}
 (Lf)_{\min} &= \frac{(1-D)^2 R}{2} \\
 L_{\min} &= \frac{(1-D)^2 R}{2f}
 \end{aligned}
 \tag{4.56}$$

Siendo f la frecuencia de conmutación en hercios.

4.5.4 Rizado de la tensión de salida

El rizado de la tensión de salida del convertidor reductor-elevador se calcula a partir de la forma de onda de la corriente en el condensador que se muestra en la Figura 4.15d.

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT = C \Delta V_o \quad (4.57)$$

Despejando ΔV_o :

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} = \frac{V_o D}{RCf}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (4.58)$$

4.5.5 Análisis en el modo de conducción discontinuo

Anulando la integral de la tensión en la inductancia durante un periodo se obtiene la relación entre tensiones.

$$\frac{V_o}{V_g} = \frac{d}{\Delta_1} \quad (4.59)$$

Donde Δ_1 representa el tiempo durante en que conduce el diodo, Y suponiendo potencias constante se obtiene la relación entre intensidades a partir de la ecuación.

$$\frac{I_o}{I_g} = \frac{\Delta_1}{d} \quad (4.60)$$

Por lo que la intensidad por la bobina queda de la siguiente forma:

$$I_L = \frac{V_g}{2L} d T (d + \Delta_1) \quad (4.61)$$

Generalmente, se busca mantener la tensión de salida constante mediante la variación del ciclo de trabajo. Por lo tanto, es interesante obtener la ecuación del ciclo de trabajo en función de las intensidades.

$$d = \frac{V_o}{V_g} \sqrt{\frac{I_o}{I_{o,lim,max}}} \quad (4.62)$$

4.6 Convertidor Cuk

En la Figura 4.16a se muestra la topología conmutada del convertidor Cuk. La magnitud de la tensión de salida puede ser mayor o menor que la entrada, y se produce una inversión de la polaridad a la salida.

La bobina de la entrada actúa como un filtro para la fuente de continua e impide la existencia de un gran contenido en armónicos. Al contrario de lo que sucedía en las anteriores topologías de convertidores, donde la transferencia de energía estaba asociada a la bobina, la transferencia de energía para el convertidor Cuk dependerá del condensador C1.

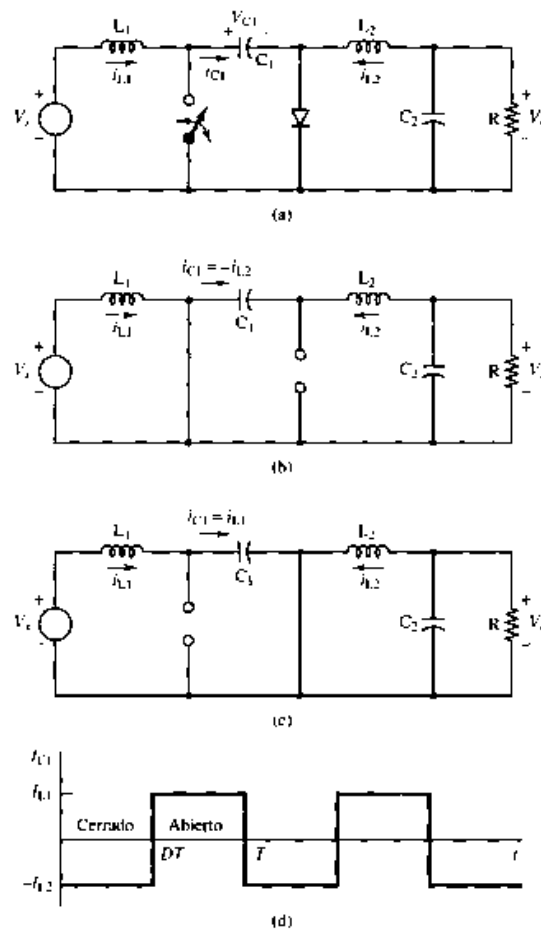


Figura 4. 16 Diagrama del circuito convertidor Cuk.

En el análisis del circuito supondremos que:

1. El valor de las dos bobinas es muy grande y las corrientes que las atraviesan son constantes.

2. El valor de los condensadores es muy grande y las tensiones en ellos son constantes.
3. El circuito opera en régimen permanente, por lo que las formas de onda de la tensión y de la corriente son periódicas.
4. El ciclo de trabajo es D, el interruptor estará cerrado en un tiempo DT y estará abierto el resto del tiempo (1-D)T.
5. El conmutador y el diodo son ideales.

La tensión media en C1 se calcula aplicando la ley de Kirchhoff para las tensiones en el bucle exterior. La tensión media en las bocinas es nula cuando el circuito funciona en régimen permanente, por lo que

$$V_{C1} = V_s - V_o \quad (4.63)$$

Cuando el interruptor está cerrado, el diodo está cortado y la corriente en el condensador C1 es

$$(i_{C1})_{\text{cerrado}} = -I_{L2} \quad (4.64)$$

Cuando el interruptor está abierto, las corrientes L1 y L2 fuerzan al diodo al entrar en conducción. La corriente en el condensador C1 es:

$$(i_{C1})_{\text{abierto}} = I_{L1} \quad (4.65)$$

La potencia absorbida por la carga es igual a la potencia entregada por la fuente

$$-V_o I_{L2} = V_s I_{L1} \quad (4.66)$$

En régimen permanente, la corriente media en los condensadores es cero. Teniendo en cuenta que el interruptor estará activado un tiempo DT y desactivado un tiempo (1-D) T, obtenemos

$$[(i_{C1})_{\text{cerrado}}]DT + [(i_{C1})_{\text{abierto}}](1-D)T = 0 \quad (4.67)$$

Utilizando las Ecuaciones 4.65 y 4.66 y sustituyendo se obtiene:

$$\begin{aligned} -I_{L2}DT + I_{L1}(1-D)T &= 0 \\ \frac{I_{L1}}{I_{L2}} &= \frac{D}{1-D} \end{aligned} \quad (4.68)$$

La potencia entregada por la fuente debe ser igual a la potencia media absorbida por la carga:

$$\begin{aligned}
P_s &= P_o \\
V_s I_{L1} &= -V_o I_{L2} \\
\frac{I_{L1}}{I_{L2}} &= \frac{-V_o}{V_s}
\end{aligned}
\tag{4.69}$$

Combinando las Ecuaciones 4.68 y 4.69 se obtiene la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada:

$$\frac{V_o}{V_s} = -\left(\frac{D}{1-D}\right) \tag{4.70}$$

El signo negativo indica una inversión de polaridad entre la salida y la entrada.

Obsérvese que los componentes a la salida L2, C2 y R están configurados de la misma manera que el convertidor reductor y que la corriente en la bobina presenta la misma forma que en el convertidor reductor. Por tanto el rizado de variación de la tensión de salida es el mismo que para el convertidor reductor,

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8L_2C_2f^2} \tag{4.71}$$

Se estima el rizado en C1 calculando la variación de Vc1 en el intervalo en el que está abierto el reductor y las corrientes iL1 e ic1 son iguales. Suponiendo que la corriente en L1 es constante y su valor es IL1.

$$\begin{aligned}
\Delta v_{C1} &\approx \frac{1}{C_1} \int_{DT}^T I_{L1} dt = \frac{I_{L1}}{C_1} (1-D)T = \frac{V_s}{RC_1f} \left(\frac{D^2}{1-D}\right) \\
\Delta v_{C1} &\approx \frac{V_o D}{RC_1f}
\end{aligned}
\tag{4.72}$$

Se calcula las fluctuaciones de las corrientes en las bobinas examinando las tensiones en las mismas con el interruptor cerrado. Cuando el interruptor está cerrado, la tensión en L1 es:

$$v_{L1} = V_s = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \tag{4.73}$$

En el intervalo de tiempo DT, cuando está cerrado el interruptor, la variación de la corriente en la bobina es:

$$\frac{\Delta i_{L1}}{DT} = \frac{V_s}{L_1}$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_s DT}{L_1} = \frac{V_s D}{L_1 f} \quad (4.74)$$

La tensión L2 cuando el interruptor está cerrado es:

$$v_{L2} = V_o + (V_s - V_o) = V_s = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (4.75)$$

La variación de i_{L2} será, por tanto:

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_s DT}{L_2} = \frac{V_s D}{L_2 f} \quad (4.76)$$

Que es igual a Δi_{L1} . Para que la corriente en las bobinas sea permanente, la corriente media deberá ser mayor que la mitad de la variación de la corriente. Los tamaños mínimos de las bobinas para que exista corriente permanente son:

$$L_{1, \min} = \frac{(1 - D)^2 R}{2Df}$$

$$L_{2, \min} = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (4.77)$$

4.7 Convertidor Flyback

El convertidor Flyback usa normalmente un solo transistor Q. durante la primera mitad del periodo de conmutación, el transistor Q está operando y de esta manera es almacenada la energía en el transformador primario, durante la segunda mitad del periodo esta energía es transferida al secundario del transformador y también hacia la carga. En la Figura 4.17 se muestra el diagrama para un convertidor Flyback.

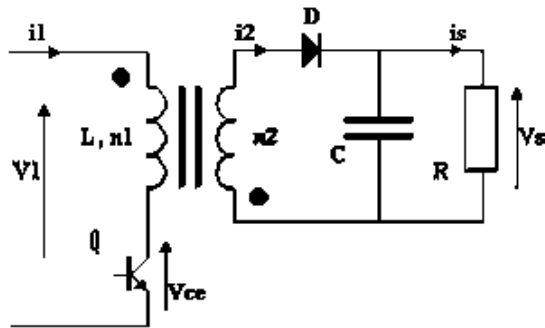


Figura 4. 17 Diagrama del circuito Flyback.

El elemento magnético funciona como inductancia de acumulación de energía. Durante un periodo T la energía almacenada es:

$$W = V_1 * \frac{i_{LM}}{2} * t_l \quad (4.78)$$

i_{LM} es la corriente i_L máxima.

En el transistor Q cuando el diodo D conduce, el voltaje en las terminales del devanado n_2 es V_s .

El voltaje V_s puede ser ajustado por medio de la relación cíclica t_1/T pero de igual forma por el periodo de conmutación del transistor Q . El número de vueltas n_1 es determinado a partir del valor de la inductancia L . n_2 es calculado de la ecuación:

$$\frac{n_1}{n_2} V_s, \quad V_{ce} \geq V_1 + \frac{n_1}{n_2} V_s \quad (4.79)$$

Con el fin de disminuir los altos voltajes en el transistor Q .

Una de las ventajas que presenta el convertidor flyback, es que no es necesaria una tensión alta en el bus de CD para obtener un alto factor de potencia como en el caso del convertidor elevador. Además de que con la relación de vueltas del transformador se tiene un grado más de libertad en el momento de seleccionar el voltaje de entrada al inversor resonante.

4.8 Aplicaciones de los convertidores de CD a CD

Estos convertidores se encuentran en muchas de las aplicaciones de sistemas de alto rendimiento, por ejemplo sistemas de tracción eléctrica, vehículos eléctricos y herramientas mecánicas. Los motores de CD con sus inductores e inercia mecánica actúan como filtros resultando en corrientes de alta calidad. El voltaje promedio de los convertidores es una función lineal de la variación del ciclo de trabajo. También son utilizados en sistemas de radar. [3]

Los convertidores pueden ser modificados para operaciones de 2 a 4 cuadrantes. Los convertidores de 2 cuadrantes pueden ser parte de una fuente de poder autónoma que contiene paquetes de baterías y las cuales son fuentes de CD renovables tales como arreglos fotovoltaicos, celdas de poder o turbinas eólicas. Los de 4 cuadrantes son aplicados en conductores en los cuales el frenado regenerativo es requerido, por ejemplo, sistemas de transportación que requieren paradas frecuentes. Los convertidores con salidas inductivas sirven como entradas para inversores de conducción de corriente.

Los convertidores pueden ser vistos como transformadores de CD para liberar hacia la carga un voltaje o corriente de CD en un nivel diferente que la fuente de entrada. Esta

transformación es mejorada por variación electrónica, no por electromagnética tal como en los transformadores convencionales. El rango de los voltajes de salida de los convertidores de CD-CD va desde 1V, hasta varios kilovolts en lámparas de rayos X. Los voltajes de salidas más comunes son 3.3 V para microprocesadores modernos, 5 y 12V para circuitos lógicos, 48V para equipos de comunicación y 270V para manejo de aviones o autobuses. Los voltajes de entrada típicos incluyen 48 V, 170 V y 270 V.

La selección de una topología de convertidores de CD-CD está determinada no solo por los voltajes de entrada/ salida, los cuales pueden ser adicionalmente ajustados con la relación en los convertidores aislados, pero también por niveles de potencial, voltaje y corriente de los semiconductores y la utilización de componentes magnéticos.

Los convertidores de CD-CD son utilizados para construir bloques de sistemas de alimentación distribuida en las cuales un conductor de voltaje CD común es convertido en varios otros voltajes. Tales sistemas son comunes en estaciones espaciales, barcos y aviones, también como equipos de comunicación y computadoras. Además, los sistemas de procesamiento de señales utilizan fuentes de alimentación variables para minimizar el consumo de energía y extender la vida útil de sus baterías. Los convertidores reductores de voltaje se utilizan en estas aplicaciones para arreglos de rectificación síncrona.

Las fuentes de poder conmutadas son otra de las aplicaciones de los convertidores de CD, ya que son necesarias para sistemas analógicos y digitales. Dichas fuentes son diseñadas para cumplir con los siguientes requisitos.

- Salida regulada. El voltaje de salida debe ser constante para tolerar cambios en un rango de voltaje de entrada.
- Múltiples salidas. En sistemas que requieren tener múltiples salidas de voltaje. Tales voltajes pueden estar aislados unos de otros.

Además de estos requerimientos el objetivo común es reducir el tamaño de la fuente, el peso y proveer eficiencia. Tradicionalmente, se han utilizado las fuentes de alimentación lineales, sin embargo, los avances en la tecnología han llevado al uso de fuentes de conmutación conmutada, las cuales son más pequeñas y eficientes comparadas con las fuentes lineales.

Los convertidores de CD-CD también se aplican en los acondicionadores de energía, ya que estos proveen una forma efectiva en la suspensión de perturbaciones eléctricas. Algunos de estos acondicionadores son el oxido de metal que provee protección contra picos de voltaje lineal, filtros de interferencia magnética que ayudan a prevenir el corte en las formas de onda y eliminar el ruido en los dispositivos, transformadores ferro resonantes, que proveen regulación de voltaje y filtrado de ruido, transformadores aislados con protección electrostática que proveen no solo aislamiento galvánico, sino también filtrado de picos de voltaje.

Para alimentar a varias cargas críticas tales como computadoras usadas para controlar procesos importantes, equipo médico, entre otros, es necesario el uso de UPSs (sistema de alimentación ininterrumpida). Estos dispositivos proveen protección contra cortes de energía, también como regulación de voltaje durante alta y baja tensión. También son excelentes en términos de supresión de líneas transitorias y armónicas.

Por último, los motores de CD que son utilizados en una amplia gama de aplicaciones desde aquellas que requieren unos pocos watts hasta las que necesitan varios kilowatts para operar, en aplicaciones de mucha precisión, posicionamiento controlado de alto rendimiento y robots para el manejo de ajuste de velocidad variable. En todos los dispositivos donde la posición y la velocidad son controladas, un convertidor electrónico de potencia es necesario como una interfaz entre la energía de entrada y el motor. Además, los convertidores son extremadamente importantes en motores de CD que ordenan la posición y la velocidad.

4.9 Diseño de convertidores propuestos

Los convertidores deben tener las siguientes características:

Confiabilidad ante sobre corrientes, sabiendo distinguir cuando exista un cortocircuito.

La eficiencia del convertidor altamente dependiente de la potencia demandada en cada instante, como los convertidores muestran una mayor eficiencia trabajando cerca de su potencia nominal, es conveniente seleccionar bien el modelo, a fin de que opere en esta condición habitualmente. El fabricante suele suministrar el rendimiento del convertidor al 70% de su potencia nominal.

Para minimizar las caídas de tensión en estado estacionario, se debe tener en cuenta las caídas de tensión ocasionadas por las sobre tensiones y aumentar la eficiencia, para evitar este tipo de problemas se toma en cuenta un calibre mayor en los conductores como requisito de diseño. Así mismo, se debe tener en cuenta esta consideración para el conductor de puesta de tierra de los equipos **Artículo 250-95. NOM-001-SEDE-2005.**

Se recomienda dividir los campos fotovoltaicos en subcampos, teniendo cada uno una corriente de cortocircuito inferior a 64 A. Esto permitirá usar equipo especificado para 100A en cada circuito fuente. Con lo anterior nos podemos dar una idea de cómo debe de ser nuestra instalación de los paneles solares y como debemos agruparlo para tener un mejor rendimiento.

4.9.1 Diseño de convertidor reductor 5V/2A/10W

Se diseña un convertidor reductor que genere una tensión de salida de 5V y una corriente de salida de 2A, dicho convertidor tendrá una potencia de salida de 10W, se desea conectar cargas como teléfonos celulares, tablets, bocinas, etc. El rizado de la tensión de salida no debe superar el 0.5%, el convertidor podrá ser conectado a un panel fotovoltaico de 18.7 V.

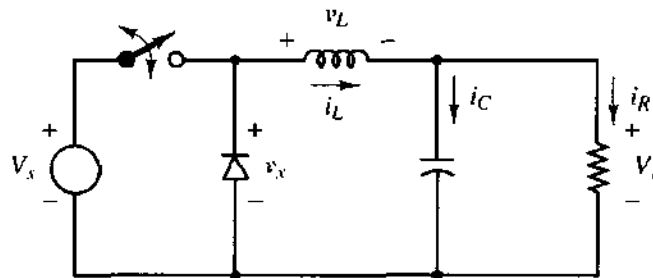


Figura 4. 18 Estructura del convertidor reductor.

La resistencia de carga se obtiene a partir de la ley de Ohm:

$$R = V_o / I_o = 5V / 2A = 2.5\Omega.$$

El ciclo de trabajo para la operación se obtiene despejando la Ecuación 4.12.

$$V_o = V_s D$$

$$D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{5}{18.7} = 0.267$$

Hay que seleccionar la frecuencia de conmutación, podría ser una frecuencia de 50kHz, que es lo suficientemente pequeña para que las pérdidas en los interruptores sean pequeñas.

El tamaño de la bobina se obtiene a partir de la ecuación 4.18.

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f}$$

$$L_{min} = \frac{R(1-D)}{2f} = \frac{2.5\Omega(1-0.267)}{2 \times 50Khz} = 0.0000183.$$

El valor de la bobina debe ser un 25% mayor que el valor mínimo, para determinar que la corriente en la bobina sea permanente, por lo tanto:

$L = 1.25 * L_{min} = 1.25 * 0.0000183 = 0.0000229$ así, el inductor será de $22.9\mu H$.

Para calcular el valor del condensador se selecciona con un rizado del 0.5% utilizando la Ecuación 4.24.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - D}{8LCf^2}$$

Despejando el Capacitor tenemos:

$$C = \frac{1}{8} * \frac{1 - D}{L * 0.005 * f^2}$$

$$\frac{1}{8} * \frac{1 - 0.267}{(0.0000229) * 0.005 * 50000^2} = 0.000320 = 320\mu F$$

Las corrientes máximas y mínimas se obtendrán utilizando las ecuaciones 4.15 y 4.16.

$$iL_{max} = V_o \left[\frac{1}{R} + \frac{1 - D}{2L} * T \right]$$

$$iL_{max} = 5 \left[\frac{1}{2.5} + \frac{1 - 0.267}{2(0.0000229)} * \frac{1}{50,000} \right] = 3.6A$$

$$iL_{min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{1 - D}{2L} * T \right]$$

$$iL_{min} = 5 \left[\frac{1}{2.5} - \frac{1 - 0.267}{2(0.0000229)} * \frac{1}{50,000} \right] = 0.39A$$

El diodo debe soportar el voltaje y la corriente máxima del inductor cuando el interruptor se abre.

$iL_{max} = 3.59A$.

El voltaje del inductor $V_L = V_g - V_o = 18.7 - 5 = 13.7V$

El rizado de la tensión de salida se calcula utilizando la ecuación 4.24

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - D}{8LCf^2}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1 - 0.267)}{8 * 0.0000229 * 0.000320 * 50,000^2} = 0.005 * 100\% = 0.5\%$$

4.9.2 Diseño de convertidor reductor 12V/2A/24W

Se diseña un convertidor reductor que genere una tensión de salida de 12V y una corriente de salida de 2 A, dicho convertidor tendrá una potencia de salida de 24W, en este convertidor se podrá conectar cargas como lámpara de led de 12v etc. El rizado de la tensión de salida no debe superar el 0.5%, el convertidor podrá ser conectado a un panel fotovoltaico de 18.7 Volts.

En la figura 4.18 se muestra el circuito convertidor reductor.

La resistencia de carga se obtiene a partir de la ley de Ohm:

$$R = V_o / I_o = 12V / 2A = 6\Omega.$$

El ciclo de trabajo para la operación del convertidor se obtiene despejando la Ecuación 4.12.

$$V_o = V_s D$$
$$D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{12}{18.7} = 0.641$$

Hay que seleccionar la frecuencia de conmutación podría ser una frecuencia de 50kHz, que es lo suficientemente pequeña para que las pérdidas en los interruptores sean pequeñas.

El tamaño de la bobina se obtiene a partir de la Ecuación 4.18.

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f}$$
$$L_{min} = \frac{R(1-D)}{2f} = \frac{6\Omega(1-0.641)}{2 \times 50Khz} = 0.0000215.$$

El valor de la bobina debe de ser un 25% mayor que el valor mínimo para determinar que la corriente en la bobina sea permanente:

$$L = 1.25 * L_{min} = 1.25 * 0.0000215 = 0.0000269 \text{ así, el inductor será de } 26.9\mu H.$$

Para calcular el valor del condensador se selecciona con un rizado del 0.5% utilizando la Ecuación 4.24

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - D}{8LCf^2}$$

Despejando el capacitor

$$C = \frac{1}{8} * \frac{1 - D}{L * 0.005 * f^2}$$

$$\frac{1}{8} * \frac{1 - 0.641}{(0.0000269) * 0.005 * 50000^2} = 0.000133 = 133\mu F$$

Las corrientes máximas y mínimas se obtendrán utilizando las Ecuaciones 4.15 y 4.16.

$$iLmax = Vo \left[\frac{1}{R} + \frac{1 - D}{2L} * T \right]$$

$$iLmax = 5 \left[\frac{1}{6} + \frac{1 - 0.641}{2(0.0000269)} * \frac{1}{50,000} \right] = 3.6A$$

$$iLmin = Vo \left[\frac{1}{R} - \frac{1 - D}{2L} * T \right]$$

$$iLmin = 5 \left[\frac{1}{6} - \frac{1 - 0.641}{2(0.0000269)} * \frac{1}{50,000} \right] = 0.39A$$

El diodo debe soportar el voltaje y la corriente máxima del inductor cuando el interruptor se abre

$iLmax = 3.59 A$.

El voltaje del inductor $VL = Vg - Vo = 18.7 - 12 = 6.7V$

El rizado de la tensión de salida se calcula utilizando la Ecuación 4.24.

$$\frac{\Delta Vo}{Vo} = \frac{1 - D}{8LCf^2}$$

$$\frac{\Delta Vo}{Vo} = \frac{(1 - 0.641)}{8 * 0.0000269 * 0.000133 * 50,000^2} = 0.005 * 100\% = 0.5\%$$

4.9.3 Diseño de convertidor elevador 19V/3.5A/66W

Se diseña un convertidor que genere 19V a la salida con una corriente de 3.5 A, la potencia del convertidor es de 66W el cual servirá para conectar cargas como computadoras, etc. el rizado de la tensión de salida debe ser menor al 1%, si el convertidor se conectará a un panel solar de 18.7V.

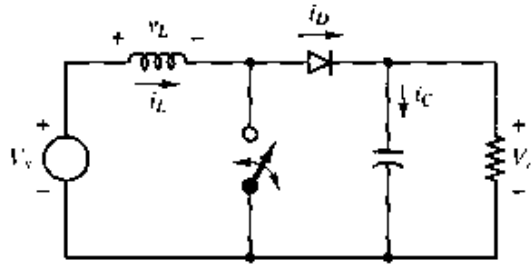


Figura 4. 19 Estructura del convertidor elevador.

Se calcula la resistencia por la ley de ohm:

$$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{19}{3.5} = 5.4\Omega.$$

Determinamos el ciclo de trabajo con la Ecuación 4.32.

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D}$$

Despejando el ciclo de trabajo tenemos:

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} = 1 - \frac{18.7}{19} = 0.0157$$

Si se selecciona una frecuencia de 40khz, podemos obtener la inductancia mínima para la corriente permanente utilizando la Ecuación 4.40.

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f}$$

$$L_{min} = \frac{0.0157 * 5.4 (1 - 0.0157)^2}{2(40,000)} = 0.00000102 \times 1.25 = 0.00000128,$$

Se tiene un valor de inductancia de 1.28μH.

El rizado debe ser menor al 1% $\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{d}{RCf} < 1\%$

Calculamos el capacitor con la Ecuación 4.43.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

Despejando el capacitor se tiene

$$C = \frac{D}{Rf(\frac{\Delta V_o}{V_o})} = \frac{0.0157}{(5.4)(40,000)(0.01)} = 0.00000726F,$$

Así el capacitor será de 7.26μF.

Se deducen los valores máximos y mínimos de la corriente a través del inductor con las Ecuaciones 4.37 y 4.38.

$$iL_{max} = Vs \left[\frac{1}{R(1-D)^2} + \frac{D*T}{2L} \right] = 18.7 \left[\frac{1}{5.4(1-0.0157)^2} + \frac{0.0157}{2*0.00000128*40,000} \right] = 6.44A$$

$$iL_{min} = Vs \left[\frac{1}{R(1-D)^2} - \frac{D*T}{2L} \right] = 18.7 \left[\frac{1}{5.4(1-0.0157)^2} - \frac{0.0157}{2*0.00000128*40,000} \right] = 0.7 A$$

Para la elección del diodo se tiene en cuenta que deben soportar un voltaje máximo igual al voltaje de salida $V_o = 19V$.

Y una corriente máxima igual a la corriente del inductor máxima que es de 6.44 A.

4.9.4 Diseño de convertidor elevador 19V/2.53A/48W

Se diseña un convertidor que genere 19V a la salida con una corriente de 2.53 A, la potencia del convertidor será de 48W el cual servirá para conectar un televisor, el rizado de la tensión de salida debe ser menor al 1%.

El convertidor será conectado al panel GP-150P-36 el cual tiene un voltaje de salida de 18.7 volts

En la figura 4.19 se muestra el circuito convertidor elevador.

Se calcula la resistencia de carga por la ley de ohm:

$$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{19}{2.53} = 7.6 \Omega$$

Determinamos el ciclo de trabajo con la Ecuación 4.32.

$$V_o = \frac{V_s}{1-D}$$

Despejando tenemos el ciclo de trabajo:

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} = 1 - \frac{18.7}{19} = 0.0157$$

Seleccionamos una frecuencia de 40kHz, que se encuentra entre el rango de frecuencias, podemos obtener la inductancia mínima para la corriente permanente utilizando la ecuación 4.40.

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f}$$

$$L_{min} = \frac{0.0157 * 7.6(1-0.0157)^2}{2(40,000)} = 0.00000144 * 1.25 = 0.00000180,$$

Se tiene una inductancia de 1.8μH.

$$\text{El rizado debe ser menor al } 1\% \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{d}{RCf} < 1\%$$

Calculamos el capacitor con la Ecuación 4.43.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

Despejando el capacitor se tiene:

$$C > \frac{D}{Rf(\frac{\Delta V_o}{V_o})} = \frac{0.0157}{(7.6)(40,000)(0.01)} = 0.0000051F, \text{ el capacitor será de } 5.1\mu F.$$

Se deducen los valores máximos y mínimos de la corriente a través del inductor con las Ecuaciones 4.37 y 4.38.

$$i_{Lmax} = V_s \left[\frac{1}{R(1-D)^2} + \frac{D * T}{2L} \right] = 18.7 \left[\frac{1}{7.6(1-0.0157)^2} + \frac{0.0157}{2 * 0.0000018 * 40,000} \right] = 4.57 \text{ A}$$

$$i_{Lmin} = V_s \left[\frac{1}{R(1-D)^2} - \frac{D * T}{2L} \right] = 18.7 \left[\frac{1}{7.6(1-0.0157)^2} - \frac{0.0157}{2 * 0.0000018 * 40,000} \right] = 0.5A$$

Para la elección del diodo se tiene en cuenta que deben soportar un voltaje máximo igual al voltaje de salida que es de $V_o = 5V$ y una corriente máxima igual a la corriente del inductor máxima que es de 4.57 A.

CAPÍTULO 5

Implementación sistemas de generación cargas en CD

5.1 Introducción

En este capítulo se describe el diseño y la implementación real de un circuito convertidor reductor conectado al sistema fotovoltaico, además se obtienen algunas mediciones para el buen funcionamiento y la realización de las pruebas finales del sistema.

5.2 Cálculos de diseño del convertidor reductor 5V/0.5A/2.5W

Se diseña un convertidor reductor para que genere una tensión de salida de 5V y una corriente de salida en la resistencia de carga de 0.5 A, por lo tanto, se tendrá una potencia de salida de 2.5W. El circuito se muestra en la figura 5.1 el cual se podrá conectar un teléfono celular. El rizado de la tensión de salida no debe superar el 0.5%, el convertidor reductor estará conectado al panel fotovoltaico que tendrá un voltaje de 33V en circuito abierto y una corriente máxima de 12.3 A. Para realizar las pruebas se utilizará el panel del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica.

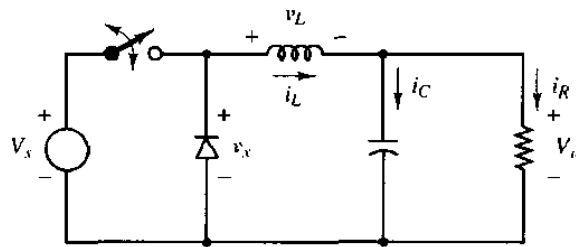


Figura 5. 1 Estructura del circuito convertidor reductor.

La resistencia de carga del convertidor se obtuvo a partir de la ley de Ohm:

$$R = V_o / I_o = 5V / 0.5A = 10\Omega.$$

El ciclo de trabajo para la operación se obtiene a partir de la Ecuación 4.12.

$$V_o = V_g D$$

Despejando el ciclo de trabajo se tiene:

$$D = \frac{V_o}{V_g} = \frac{5}{33} = 0.152$$

Se seleccionó una frecuencia de conmutación de 20kHz, que es lo suficientemente pequeña para que las pérdidas en los interruptores sean mínimas.

El tiempo de conmutación es el inverso de la frecuencia, que es de:

$$T = 1/F = 1/20000 = 0.00005S = 50\mu s.$$

El 15.2% de 50μs en el tiempo en estado bajo es de $15 \cdot 50\mu s / 100 = 7.5\mu s$.

El tamaño de la bobina se obtuvo a partir de la ecuación 4.18

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f}$$

$$L_{min} = \frac{10\Omega(1-0.152)}{2 \times 20Khz} = 0.000212.$$

Se determino que el valor de la bobina sea un 25% mayor que el valor mínimo para asegurar que la corriente en la bobina sea permanente

$$L = 1.25 \cdot L_{min} = 1.25 \cdot 0.000212 = 0.000265,$$

Por lo tanto, el inductor será de 265μH.

Para calcular el valor del condensador se selecciona utilizando la Ecuación 4.24.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - D}{8LCf^2}$$

Despejando el capacitor se obtiene:

$$C = \frac{1}{8} * \frac{(1 - D)}{\frac{\Delta V_o}{V_o} L f^2}$$

$$C = \frac{1}{8} * \frac{(1 - 0.152)}{(0.000265)(0.005) * 20,000^2} = 0.0002 = 200\mu F$$

Las corrientes máximas y mínimas se obtendrán utilizando las Ecuaciones 4.15 y 4.16.

$$iLmax = Vo \left[\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2L} * T \right]$$

$$iLmax = 5 \left[\frac{1}{10} + \frac{1-0.152}{2(0.000265)} * \frac{1}{20,000} \right] = 0.902A$$

$$iLmin = Vo \left[\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2L} * T \right]$$

$$iLmin = 5 \left[\frac{1}{10} - \frac{1-0.152}{2(0.000265)} * \frac{1}{20,000} \right] = 0.1A$$

El diodo debe soportar el voltaje y la corriente máxima del inductor cuando el interruptor se abre.

La corriente que debe soportar el diodo es de $iLmax = 0.902 A$.

El voltaje que debe soportar el diodo es del voltaje del inductor $VL = Vg - Vo = 33 - 5 = 28V$.

Por lo tanto, el diodo debe soportar una corriente de 0.903 A y un voltaje de 28 V.

El cálculo del rizado de la tensión de salida se calcula utilizando la Ecuación 4.24.

$$\frac{\Delta Vo}{Vo} = \frac{1-D}{8LCf^2}$$

$$\frac{\Delta Vo}{Vo} = \frac{(1-0.152)}{8 * 0.000265 * 0.0002 * 20,000^2} = 0.005 * 100\% = 0.5\%$$

5.3 Diseño del circuito convertidor

Se utilizó el integrado TL494 que se muestra en la Figura 5.2, para generar la señal PWM de conmutación, este integrado se puede alimentar con un voltaje Vcc que va de 7V a 40V. Su frecuencia máxima de oscilación es de 200kHz. El voltaje máximo de salida en el colector C1 y C2 es de 40V. La corriente de salida máxima en C1 y C2 es de 200mA.

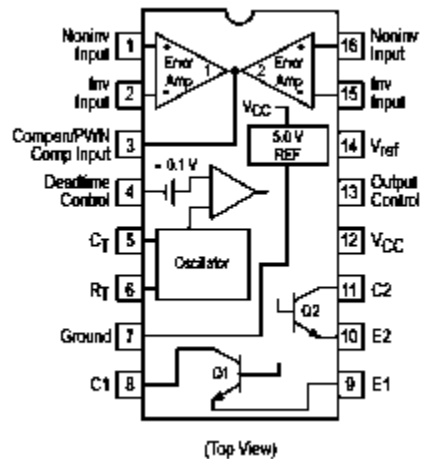


Figura 5. 2 Configuración del integrado TL494.

Los pines CT Y RT se utilizan para determinar la frecuencia de conmutación. Se utilizó un capacitor de 10nF y la frecuencia de conmutación de 20kHz. El cálculo de la resistencia RT se obtuvo mediante la fórmula $RT = \frac{1.1}{10nF * 20,000} = 5.5k\Omega$. Por lo tanto en el circuito se utilizará una resistencia de 5.5kΩ y un capacitor de 10nF.

Se utilizó el integrado Tip32C que, es un transistor PNP con voltaje de colector-emisor hasta 100V, con voltaje colector- base hasta 100V, corriente colector 3 A y corriente de base 1 A, a una frecuencia de conmutación de 3MHz, el integrado se muestra en la Figura 5.3.

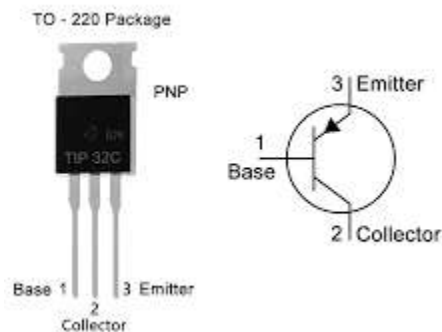


Figura 5. 3 Configuración del TIP32C.

Se empleo el diodo MR850, este es un diodo de conmutación rápida, a una frecuencia de 1MHz. El tiempo de recuperación inversa es de 150ns, y soporta una corriente máxima de 3A.

Se usó una bobina de 265μH para tener una corriente permanente, así como un capacitor de 180μF para un rizado de salida del 0.5%.

Se realizó una simulación previa del circuito, utilizando el simulador Proteus 8 Profesional tal cual se muestra en la Figura 5.4.

Proteus 8 es una aplicación para la ejecución de proyectos de construcción de equipos electrónicos desde el diseño del esquema electrónico, programación de software, construcción de la placa del circuito impreso, simulación de todo el conjunto, depuración de errores, documentación y construcción. [9]

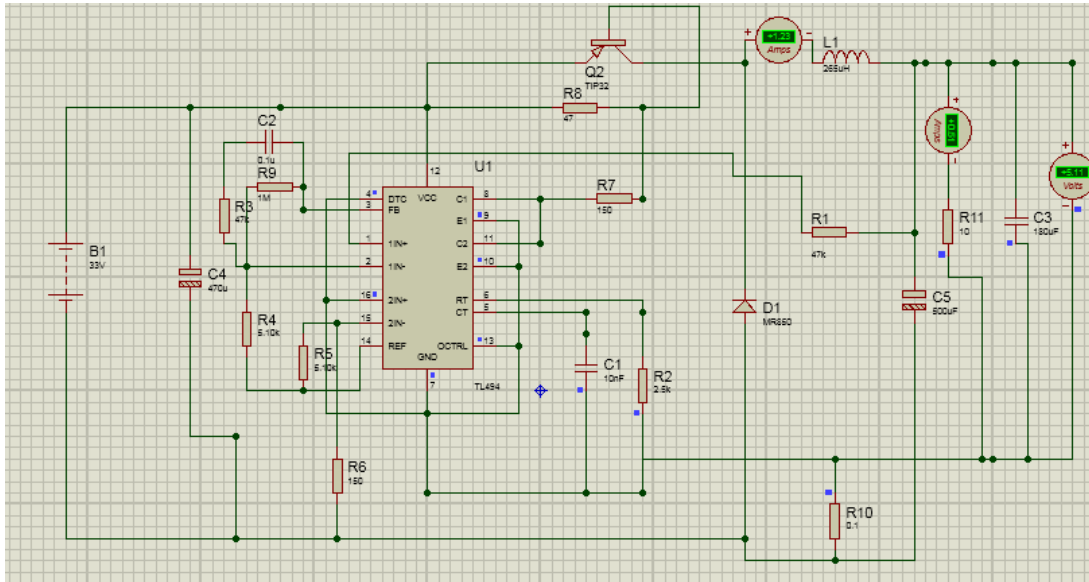


Figura 5. 4 Simulación del circuito convertidor reductor.

En la Figura 5.5 se observa los resultados obtenidos en la simulación, se observa que, la corriente en la resistencia de carga es de 0.5A, el voltaje de salida del convertidor es de 5.11 V y la corriente máxima en el inductor es de 1.23 A.

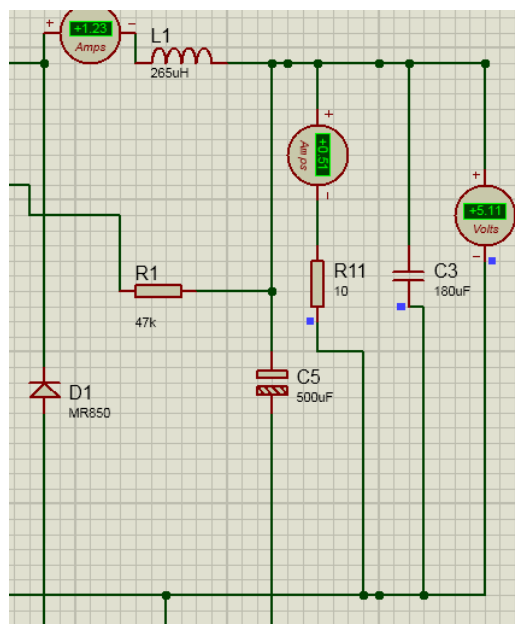


Figura 5. 5 Resultados obtenidos en la simulación.

Se ensambló todos los componentes necesarios para implementar el circuito convertidor reductor utilizando una tableta Protoboard. El cual se muestra en la Figura 5.6.

Una Protoboard es una tabla de plástico con pequeños agujeros en ella, estos, permiten insertar fácilmente componentes electrónicos para hacer un prototipo o circuito electrónico. [10]

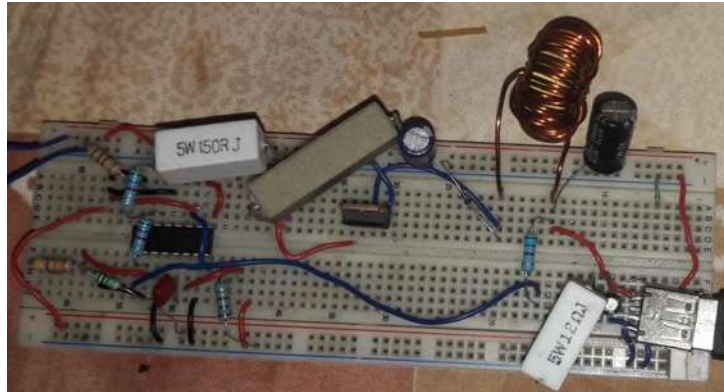


Figura 5. 6 Implementación del circuito en el protoboard.

5.4 Resultados reales obtenidos

Para comprobar el funcionamiento del convertidor reductor se utilizó una fuente de voltaje de CD variable de 33V, se utilizó el instrumento de medición, un multímetro digital de marca FLUKE y se midió la corriente de entrada del circuito que fue de 0.366 A como se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5. 7 Corriente de entrada del convertidor.

El multímetro digital es una herramienta de prueba usada para medir dos o más valores electrónicos, principalmente tensión, corriente y resistencia. Es una herramienta de diagnostico estándar para los técnicos de las industrias eléctricas y electrónicas. [11]

El frente de un multímetro digital normalmente incluye cuatro componentes:

- Pantalla donde se observan las lecturas de medición
- Botones para seleccionar varias funciones
- Selector para seleccionar los valores de medición primarios
- Conectores de entrada donde se insertan los cables de prueba

Con el instrumento de medición FLUKE se midió el voltaje de salida del convertidor y se obtuvo un voltaje de CD de 4.99V como se observa en la Figura 5.8.



Figura 5. 8 Voltaje de salida del convertidor reductor.

Se utilizó el osciloscopio para medir la señal PWM de conmutación en la salida del integrado TL494 obteniendo el resultado como se muestra en la Figura 5.9, se observa que la señal de frecuencia de conmutación es de 20.3kHz, con un ciclo de trabajo de 15.2% y un periodo de 49.2μs.

El Osciloscopio es un instrumento de medición eléctrico en el cual se presenta gráficamente la magnitud de una señal eléctrica con respecto al tiempo. La pantalla del osciloscopio consta de dos ejes, el eje X que representa el tiempo y el eje Y que representa el voltaje. Se utiliza para visualizar las formas de ondas en circuitos eléctricos y electrónicos. [12]

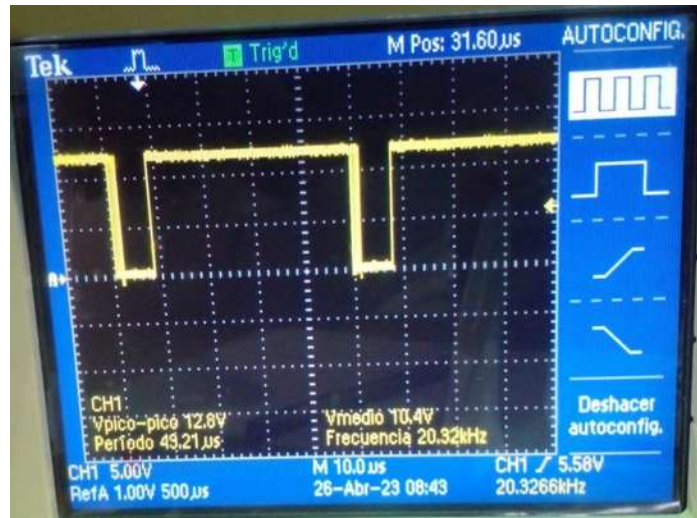


Figura 5. 9 Señal de conmutación PWM.

En el osciloscopio se midió la señal de oscilación en el capacitor CT ubicada en el pin 5, obteniendo la siguiente señal como se muestra en la Figura 5.10.

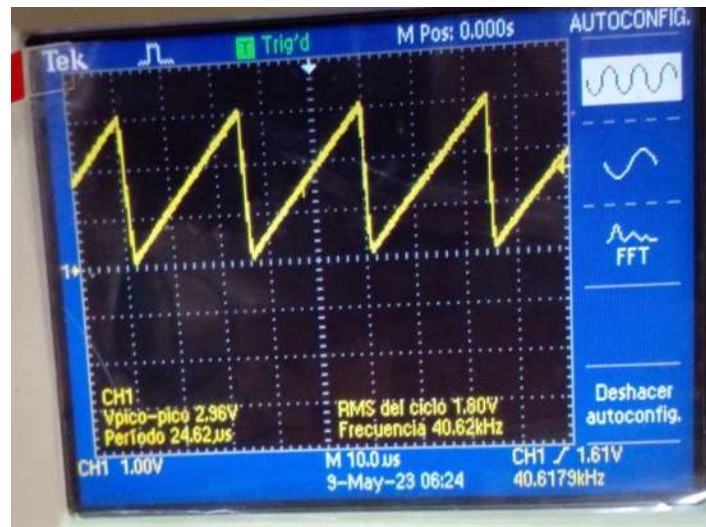


Figura 5. 10 Señal en el capacitor CT.

El cálculo de la corriente en la resistencia de carga fue de $I=5/10 = 0.5$ A, y se comprobó con el instrumento de medición midiendo la corriente en la resistencia de carga y así se observó una corriente de 0.46 A como se muestra en la Figura 5.11.



Figura 5. 11 Corriente en la resistencia de carga.

En la Figura 5.12 se muestra la corriente medida en el inductor, que fue de 0.906 A.



Figura 5. 12 Corriente en el inductor.

Por último, se conectó un teléfono celular en la salida del convertidor como se observa en la Figura 5.13.

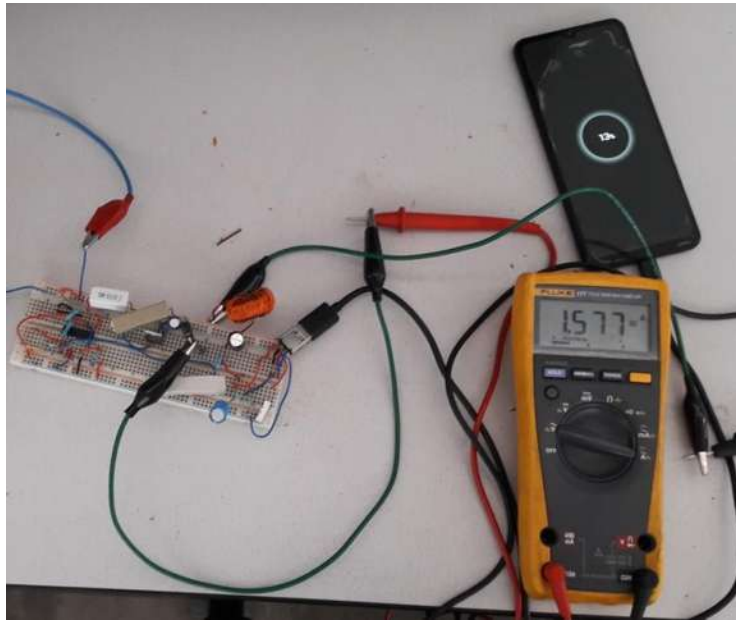


Figura 5. 13 Funcionamiento del convertidor

En la Figura 5.14 se muestra la corriente de carga en el teléfono celular que fue de 0.423 A.



Figura 5. 14 Corriente de carga en el teléfono.

Se observo que, cuando se conecta el teléfono celular dependiendo del modelo, la resistencia de carga disminuye (en este caso a 5.4Ω). Por lo tanto la corriente en el inductor se incrementa hasta 1.586 A.



Figura 5. 15 Corriente en el inductor.

En la Figura 5.16 se muestra el porcentaje de carga en el teléfono celular, en un tiempo de 5 minutos alcanzo a incrementar una carga del 2%.



Figura 5. 16 Porcentaje de carga en el teléfono.

5.5 Prueba real conectando el panel fotovoltaico

Se realizó la prueba real del sistema conectando el convertidor reductor al panel solar fotovoltaico Instalado en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica como se muestra en la Figura 5.17 y cuyas especificaciones eléctricas son:

El voltaje de salida del panel es de 33V, teniendo una radiación de 108W/m^2 y generando una corriente de 1.7 A en un día nublado.



Figura 5. 17 Conexión del convertidor al panel fotovoltaico.

Con el multímetro FLUKE se midió el voltaje de salida del convertidor reductor que fue de 5V como se muestra en la Figura 5.18.

Se midió la corriente en la resistencia de carga y fue de 0.483 A como se muestra en la Figura 5.19.

Se midió la corriente en el inductor y fue de 0.915 A con una resistencia de carga es de 10Ω y se muestra en la Figura 5.20.



Figura 5. 18 Voltaje de salida del convertidor.



Figura 5. 19 Corriente en la resistencia de carga.



Figura 5. 20 Corriente en el inductor.

Por último, se conectó el teléfono celular al convertidor conectado al panel solar teniendo una carga regular. En este caso la corriente en el inductor se incrementa a 1.577 A y la corriente de entrada al convertidor fue de 0.157 A. En la Figura 5.21 se observa el circuito total con las cargas anteriormente mencionadas funcionando.

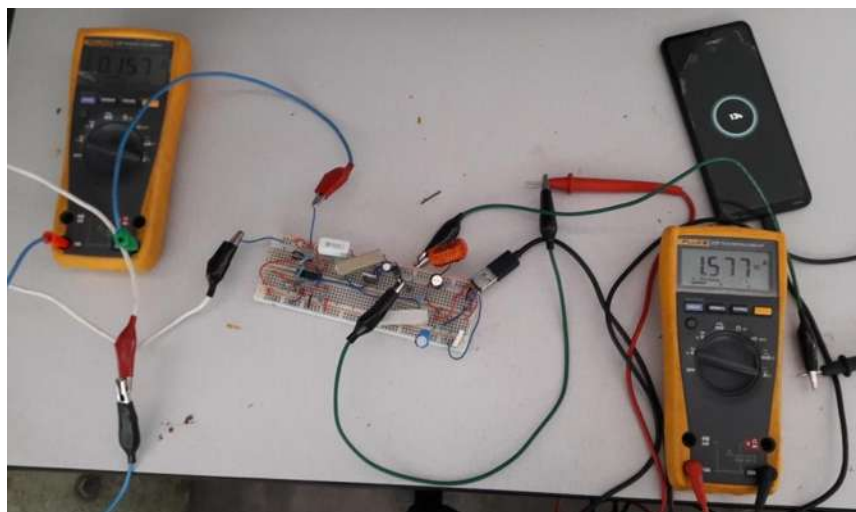


Figura 5. 21 Funcionamiento del Convertidor conectado al panel fotovoltaico y con la carga.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Se realizó una investigación acerca de los antecedentes de la electrónica de potencia así como también el estudio detallado de los diferentes dispositivos de potencia, como son los diodos, tiristores, transistores, mosfet, etc. Se estudió sus funcionamientos básicos para obtener los dispositivos más viables que se pueden utilizar en los diferentes convertidores de CD a CD.

Se hizo una investigación detallada acerca del descubrimiento y antecedentes de las celdas fotovoltaicas así como también se estudio su funcionamiento básico de los diferentes elementos del sistema de generación fotovoltaica como los paneles solares, las baterías, los reguladores de carga.

Se efectuaron los cálculos necesarios para el diseño de un sistema de generación fotovoltaico donde el diseño de los paneles fotovoltaicos será conectado en paralelo para tener un sistema de generación con una potencia total de 3 kilowatts.

Se llevo a cabo una investigación detallada acerca de los diferentes convertidores de CD a CD, el convertidor-elevador, el convertidor-reductor, el convertidor elevador-reductor el convertidor Cuk, el convertidor Fryback, desde el principio básico de su funcionamiento así como la realización de cálculos necesarios y las diferentes fórmulas que se utilizarán para los funcionamientos básicos de los diferentes convertidores.

Se realizaron los cálculos necesarios para el diseño de 4 convertidores de CD-CD dos convertidores elevadores y dos convertidores reductores para conectar diferentes cargas, estos diseños solamente fueron calculados, no se implementaron.

Se hicieron los cálculos necesarios para el diseño de un convertidor reductor cuyo voltaje de salida es de 5V y una corriente de 0.5 A. Este convertidor se conectará a un sistema fotovoltaico de salida de 33 volts. Se realizó una simulación previa del circuito y se montó el circuito convertidor en un protoboard. Se realizaron diferentes pruebas de funcionamiento con una fuente aislada y por último se realizó la prueba final conectando el convertidor al panel solar instalado en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, el cual se conectó un teléfono celular a la salida del convertidor, encontrando que, en un tiempo de 5 minutos la carga fue del 2%.

Se cumplió con el objetivo de la tesis, el cual se diseñó e implementó un convertidor de CD a CD conectado un sistema de generación fotovoltaica.

6.2 Recomendaciones

Es recomendable utilizar los convertidores de CD-CD en algunos dispositivos electrónicos donde se requiere de su uso como por ejemplo teléfonos celulares, computadoras portátiles, bocinas, tablets, televisores, lámparas de CD etc. En donde no se requiere de su uso utilizar los inversores de CD-CA ya que en los motores, microondas y otros dispositivos electrónicos utilizan corriente alterna para su funcionamiento.

Bibliografía

[1] Libro electrónica de potencia, Daniel W. Hart, Introducción a la electrónica de Potencia Prentice Hall, año 2001, 210 a 222. Consultado en 03-2023.

[2] Introducción a los sistemas de potencia, universidad de valencia, PDF, consultado en:

<https://www.uv.es/emaset/descargas/IEP1-0506.PDF> con fecha 12-2022.

[3] Edilberto Santa María Caro, junio 2008. Consultado en:

http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/10623.pdf con fecha 03-2023

[4] FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM, celdas fotovoltaicas, consultado en:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/624/4/A-4.pdf>
con fecha 02- 2023.

[5] Convertidores de CD-CD consultado en:

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/martinez_v_da/capitulo2.pdf
con fecha 03-2023.

[6] Historia de las células solares, revista JAB consultado en:

<https://www.grupojab.es/historia-de-las-celulas-solares-y-su-evolucion-tecnologica/> con
fecha 01-2023.

[7] Antecedentes de la electrónica de potencia, revista club ensayos, consultado en:

<https://www.clubensayos.com/Historia/Antecedentes-De-La-Electr%C3%B3nica-De-Potencia/1413960.html> con fecha 11-2022.

[8] NOM-001-SEDE-2005 Artículo 690-8 , consultado en:

<http://www.isademexico.com/filesdownload/sener/noms/NOM-001-SEDE-2005/NOM-001-SEDE-2005.pdf> con fecha 02-2023.

[9] proteus consultado en:

<https://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/2-proteus.html> con fecha 05-2023

[10] Protoboard consultado en:

<https://descubrearduino.com/protoboard/> con fecha 05-2023.

[11] Que es un multímetro digital consultado en:

<https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/que-es-un-multimetro-digital#:~:text=Es%20una%20herramienta%20de%20diagn%C3%B3stico,precisi%C3%B3n%2C%20fiabilidad%20y%20mayor%20impedancia>. Con fecha 05-2023.

[12] Que es un osciloscopio, revista Logicbus, consultado en:

[https://www.logicbus.com.mx/osciloscopio.php#:~:text=Un%20osciloscopio%20es%20un%20instrumento,vertical\)%20que%20representa%20el%20voltaje](https://www.logicbus.com.mx/osciloscopio.php#:~:text=Un%20osciloscopio%20es%20un%20instrumento,vertical)%20que%20representa%20el%20voltaje). Con fecha 05-2023.