

---

---

# **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico**

**Subdirección Académica**

**Departamento de Ingeniería Electrónica**

**TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**Criterios para la Implementación de Convertidores  
Electrónicos de Potencia en Aplicaciones de Media Tensión**

presentada por

**Ing. Zabdi Gladys Flores Chávez**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica**

Director de tesis

**Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel**

Codirector de tesis

**Dr. Carlos Aguilar Castillo**



Cuernavaca, Mor., 8 de enero de 2018.


OFICIO No. DIE/003/2018

**Asunto:** Aceptación de documento de tesis


**Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez**  
Subdirector Académico  
Presente

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **C. Zabdi Gladys Flores Chávez** con número de control **M16CE039** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Criterios para la Implementación de Convertidores Electrónicos de Potencia en Aplicaciones de Media Tensión**" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


DIRECTOR DE TESIS

  
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 9884229

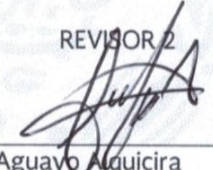
CODIRECTOR DE TESIS

  
Dr. Carlos Aguilar Castillo  
Doctor en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica  
Cédula profesional 3581040

REVISOR 1

  
Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 4033213

REVISOR 2

  
Dr. Jesús Aguayo Aquicira  
Doctor en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica  
Cédula profesional 4706315

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante  
Expediente

RFEJ/lrr.





Cuernavaca, Mor., 9 de enero de 2018

**OFICIO No. SAC/002/2018**

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**ING. ZABDI GLADYS FLORES CHÁVEZ  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Criterios para la Implementación de Convertidores Electrónicos de Potencia en Aplicaciones de Media Tensión”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



**SEP TecNM  
CENTRO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA**

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr





# *Dedicatoria*

*A mi madre y hermanos*

*por siempre creer en mi*

*y alentarme a luchar por mis sueños*





## *Agradecimientos*

A mi madre, porque siempre ha confiado en mí, en todos los momentos difíciles ha encontrado las palabras para alentarme a tomar las decisiones correctas, gracias a ella he aprendido que una caída no significa el final de la batalla, que lo más importante es tener con quien compartir tus logros y a ser siempre agradecida. Gracias mamá porque este logro es de ambas.

A mis hermanos, Ingrid y Agustín, que a pesar de estar lejos siempre hemos encontrado la manera de apoyarnos, porque aunque somos muy diferentes han confiado en mí y me han ayudado a luchar por lo que quiero. Quiero ser un buen ejemplo para ustedes y poder ser su apoyo, así como ustedes lo han sido para mí, los quiero mucho.

A mis tíos Helder, Leslie, Jesús, Chely, Faride y César por todo el apoyo que me han brindado y sus consejos para afrontar adversidades.

A Iván por volverse mi mejor amigo durante la maestría, escucharme y apoyarme cuando todo se tornaba difícil, por esas palabras de ánimo. Gracias por hacer más amena la maestría y por tomar el papel de primo y cuidar de mí. Creo que llegamos al final porque aprendimos a no dejarnos atrás.

A Saúl por ser una parte importante durante mi estancia en Cuernavaca, por ayudarme a ser una mejor persona, por su apoyo y cariño durante las adversidades y siempre confiar en mí.

A mis compañeros de generación Iván, Daniel y Roberto por apoyarme con aquellas materias que se me dificultaban y compartir esos momentos de estrés y desvelos.

A Yesi, Luna, Roberto Gamboa, Oswaldo, Josué y Carlos Lara por brindarme su amistad, además de compartir momentos que hicieron más grata la estancia durante la maestría.

Al Dr. Jesús Mina por confiar en mi y darme su apoyo para realizar mis residencias en cenidet, así como contar con sus consejos para ingresar a la maestría.

Al Dr. Carlos Aguilar porque más que un profesor muchas veces encontré el apoyo de un amigo en él, por sus consejos, regaños y exigencias, porque todo eso ha servido para mi formación profesional y personal. Gracias por siempre brindarme su apoyo y por todas sus enseñanzas, además de guiarme durante la realización de mi tesis.

Al Dr. Jaime Arau por sus consejos en la realización de mi tesis, por el apoyo brindado y compartir sus conocimientos y experiencias.

Al Dr. Hugo Calleja por su apoyo brindado desde el momento en que realice mis residencias profesionales, así como también por sus observaciones y comentarios realizados en mi trabajo de tesis.

Al Dr. Jesús Aguayo por compartir sus conocimientos y experiencias como revisor de mi trabajo. Así también por brindarme su confianza y apoyo como amigo más que como profesor, por todos sus consejos y enseñanzas.

Al Dr. Abraham por apoyarme a comprender temas de mi trabajo de tesis y siempre estar dispuesto a resolver mis dudas, por compartir sus conocimientos y experiencias.

Al Dr. Francisco Canales por compartir sus conocimientos y experiencias, además de siempre estar dispuesto a resolver mis dudas y guiarme durante la realización de mi tesis.

A CENIDET, especialmente al departamento de electrónica por permitirme ser parte de esta gran familia, por enseñarme la importancia de la convivencia y el compañerismo, por prestarme sus instalaciones para realizar mi trabajo de tesis.

A la Lic. Lorena quien siempre se preocupa por todos los alumnos y es de gran apoyo para todo el departamento de electrónica.

A CONACYT por promover el estudio a nivel posgrado en México, por brindarme el apoyo económico necesario para continuar mis estudios y finalizar mi trabajo de tesis.

## RESUMEN

Las aplicaciones de media tensión como sistemas de tracción, redes eléctricas inteligentes y energías renovables, entre otras, utilizan convertidores electrónicos de potencia que operan con rangos de media tensión (1 – 15 kV) para interconectarse con la red eléctrica, y baja tensión (<1kV) para suministrar energía eléctrica a sus elementos. Además, estos convertidores manejan alta potencia (MW), operan con frecuencias de 1 – 50 kHz, y sus diseños deben ser compactos y ligeros.

En los últimos años el desarrollo de nuevas topologías para convertidores electrónicos de media tensión se ha reducido en gran medida, no obstante con las topologías ampliamente conocidas es posible conseguir los niveles de potencia requeridos. Los principales problemas en su diseño y fabricación son la cantidad de elementos que requieren, la complejidad de implementación, el volumen y peso, la baja eficiencia y el alto costo, además de la poca disponibilidad de elementos que bloqueen los niveles de media tensión.

Por lo anterior, es indispensable mejorar todos esos aspectos de los convertidores de media tensión y una opción es mediante el uso de nuevas alternativas en su fabricación y diseño. Sin embargo identificar esas alternativas no resulta fácil debido a que en su mayoría son desarrolladas por el sector industrial y por lo tanto son confidenciales.

Por ello en este trabajo se revisan de manera teórica diferentes alternativas que mejoren características de eficiencia, diseño y costo en los convertidores electrónicos de media tensión. Los temas que se abordan son tecnologías para MOSFET e IGBT, y sus circuitos impulsores de compuerta, alternativas de diseño y fabricación de los elementos pasivos, y estrategias de manejo térmico.

---

---

## ABSTRACT

Medium voltage applications such as traction systems, smart electrical grids and renewable energies, among others, use electronic power converters operating with medium voltage levels (1 – 50 kV) to interconnect with the electrical grid, and low voltage (<1kV) to supply electrical power to their elements. In addition, other features of these converters are operating at high power (MW) and frequencies of 1-50 kHz, the designs must be compact and lighter.

In recent years, the development of new topologies for medium voltage electronic converters have been greatly reduced; however, with the well-known topologies it is possible to achieve the required power levels. The main problems in their design and manufacture are the number of elements that require the implementation complexity, volume and weight, low efficiency and high cost, as well as, the limited access of elements that block medium voltage levels.

Therefore, it is essential to improve all these aspects of medium voltage converters and one option is through the use of new alternatives in their manufacture and design. However, identifying these alternatives is not simple because most of them are developed by the industrial sector; thus, they are confidential.

This thesis reviewed different alternatives that improve efficiency features, design and cost in electronic medium voltage converters. The topics presented are technologies for MOSFET and IGBT, and their gate driver circuits, alternatives for the design and manufacture of passive elements, and thermal management strategies.

---

---

# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	vii
NOMENCLATURA .....	ix
ACRONIMOS.....	x
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
Antecedentes.....	3
Objetivos .....	10
<i>Objetivo general</i> .....	10
<i>Objetivos particulares</i> .....	11
Alcances y limitaciones.....	11
Taxonomía de la investigación .....	11
Organización de la tesis.....	15
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>17</b>
<b>INTERRUPTORES DE POTENCIA MOSFET E IGBT</b> .....	<b>17</b>
Requerimientos .....	19
Materiales.....	20
Interruptor tipo MOSFET .....	22
Interruptor tipo IGBT.....	24
MOSFET contra IGBT .....	27
Retos de integración .....	28
Conclusiones .....	29

<b>CAPÍTULO 3</b> .....	31
<b>CIRCUITOS IMPULSORES DE COMPUERTA</b> .....	31
Requerimientos .....	33
Señal de control .....	35
Fuente de alimentación .....	38
Sincronización de compuertas .....	40
Retos de integración .....	45
Conclusiones .....	46
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	49
<b>ELEMENTOS PASIVOS</b> .....	49
Transformador de alta frecuencia.....	51
Requerimientos .....	51
Núcleo .....	52
Devanados .....	54
Alternativas implementadas.....	56
Capacitor para el bus CD .....	60
Requerimientos .....	60
Capacitor de película de polipropileno metalizada.....	61
Retos de integración .....	62
Conclusiones .....	63
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	65
<b>SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO</b> .....	65
Alternativas para el transformador de alta frecuencia.....	67
Alternativas para dispositivos semiconductores.....	68
Conclusiones .....	73



**CAPÍTULO 6** ..... 75

**CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS** ..... 75

    Conclusiones ..... 77

    Trabajos a futuro ..... 82

**REFERENCIAS** ..... 83



# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ESTRUCTURA CONVENCIONAL DEL SISTEMA DE TRACCIÓN. ....	3
FIGURA 1.2 ESTRUCTURAS BÁSICAS PARA CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE MEDIA TENSIÓN. (A) UN ESTADO, (B) DOS ESTADOS CON BUS CD EN BAJA TENSIÓN, (C) DOS ESTADOS CON BUS DE CD EN ALTA TENSIÓN, (D) TRES ESTADOS CON BUS DE CD EN ALTA Y BAJA TENSIÓN. ...	5
FIGURA 1.3 CONVERTIDOR CD - CD AISLADO PARA APLICACIONES DE MEDIA TENSIÓN. ....	5
FIGURA 1.4 ARREGLOS DE INTERRUPTORES DE BAJA TENSIÓN PARA CONVERTIDORES DE MEDIA TENSIÓN. (A) SERIE, (B) MODULAR. ....	9
FIGURA 1.5 INTERRUPTORES FLOTADOS EN ARREGLO SERIE PARA CONVERTIDORES DE MEDIA TENSIÓN. ....	9
FIGURA 1.6 GRÁFICA CUANTITATIVA DE LOS TEMAS QUE SE ABORDAN EN REVISTAS RELACIONADAS CON CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE MEDIA TENSIÓN. ....	12
FIGURA 1.7 DIAGRAMA DE BÚSQUEDA PARA MOSFET E IGBT EN CONVERTIDORES DE MEDIA TENSIÓN. ....	13
FIGURA 1.8 DIAGRAMA DE BÚSQUEDA PARA CIRCUITOS IMPULSORES DE COMPUERTA EN CONVERTIDORES DE MEDIA TENSIÓN. ....	14
FIGURA 1.9 DIAGRAMA DE BÚSQUEDA PARA ELEMENTOS PASIVOS EN CONVERTIDORES DE MEDIA TENSIÓN. ....	14
FIGURA 1.10 DIAGRAMA DE BÚSQUEDA PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EN CONVERTIDORES DE MEDIA TENSIÓN. ....	15
FIGURA 2.1 COMPARACIÓN DE DOPADO, ESPESOR Y TENSIÓN DE BLOQUEO ENTRE CARBURO DE SILICIO Y SILICIO [41]. ....	22
FIGURA 2.2 MOSFET SIC 15kV/15A [43]. ....	23
FIGURA 2.3 . ESTRUCTURA INTERNA DEL N-IGBT EN SIC [51]. ....	25
FIGURA 2.4 CONEXIÓN PLANAR PARA INTERRUPTORES DE SIC [61]. ....	28
FIGURA 2.5 EMPAQUES DISPONIBLES COMERCIALMENTE PARA IGBT (A) MÓDULO, (B) PRESIÓN. ....	29
FIGURA 3.1 ESQUEMA DEL CIRCUITO IMPULSOR DE COMPUERTA EN ARREGLO SERIE DE INTERRUPTORES. ....	33
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE INTERRUPTORES EN SERIE SIN REFERENCIAR A LA SEÑAL DE TIERRA. ....	34
FIGURA 3.3 REPRESENTACIÓN DE INTERRUPTORES SIN SINCRONIZAR. ....	34
FIGURA 3.4 CIRCUITO DE OPTO AISLAMIENTO CON EL OPTOACOPLADOR OPI1268. ....	35
FIGURA 3.5 ESQUEMA DEL AISLAMIENTO CAPACITIVO. ....	36
FIGURA 3.6 DIAGRAMA A BLOQUES DEL AISLAMIENTO DE 30kV CON TRANSFORMADORES. ....	37
FIGURA 3.7 DIAGRAMA DE AISLAMIENTO CON UN TRANSFORMADOR. ....	37
FIGURA 3.8 FUENTE DE ALIMENTACIÓN AISLADA CON TRANSFORMADOR FORMADO POR NÚCLEO TOROIDAL Y CABLE DE ALTO AISLAMIENTO. ....	38
FIGURA 3.9 DIAGRAMA DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN AISLADA CON UN TRANSFORMADOR ENCAPSULADO. ....	39
FIGURA 3.10 DIAGRAMA DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN AISLADA CON INDUCTORES PLANARES. ....	39
FIGURA 3.11 CIRCUITO DE BALANCE DINÁMICO CON CAPACITORES. ....	42
FIGURA 3.12 REDES DE AMORTIGUAMIENTO PASIVAS PARA IGBT. (A) RC, (B) RCD, (C) CIRCUITO PC, (D) CIRCUITO MODIFICADO. ....	43
FIGURA 3.13 CIRCUITO DE ENCLAVAMIENTO PARA EL BALANCE DINÁMICO EN MOSFET. ....	43

FIGURA 3.14 DIAGRAMA A BLOQUES DE LA TÉCNICA DE ENCLAVAMIENTO COMBINADA CON UNA RED DE AMORTIGUAMIENTO PASIVA. ....	44
FIGURA 3.15 DIAGRAMA A BLOQUES DEL CONTROL ACTIVO DE LA COMPUERTA PARA BALANCE DE TENSIÓN DINÁMICO Y ESTÁTICO.....	44
FIGURA 3.16 DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE BALANCE DINÁMICO CON FPGA, FUENTES DE TENSIÓN Y CORRIENTE.....	45
FIGURA 4.1 ESTRUCTURA DEL CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE MEDIA TENSIÓN CON TRANSFORMADOR DE ALTA FRECUENCIA.....	51
FIGURA 4.2 ESTRUCTURAS PARA TRANSFORMADORES DE ALTA FRECUENCIA - POTENCIA. (A) CORE, (B) SHELL, (C) MATRIZ [63]. ....	54
FIGURA 4.3 TRANSFORMADOR DE 350kW@10KHZ DISEÑADO POR ABB® [11].....	56
FIGURA 4.4 CELDA DE 150KVA@1.7KHZ PARA UN CONVERTIDOR DE 1.2MVA [18]. ....	57
FIGURA 4.5 TRANSFORMADOR DE 1MW@20KHZ. (A) CON NÚCLEO DE FERRITA, (B) CON NÚCLEO NANOCRISTALINO [106].....	57
FIGURA 4.6 TRANSFORMADOR CON NÚCLEO TIPO CORE [107]. ....	58
FIGURA 4.7 TRANSFORMADOR CON NÚCLEO TIPO SHELL [107]. ....	58
FIGURA 4.8 TRANSFORMADOR CON NÚCLEO MATRICIAL [107]. ....	59
FIGURA 4.9 BUS DE CD EN UN CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE MEDIA TENSIÓN.....	60
FIGURA 4.10 COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LOS TIPOS DE CAPACITORES PARA EL BUS DE CD EN CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE MEDIA TENSIÓN [110].....	61
FIGURA 4.11 ESTRUCTURA INTERNA DEL CAPACITOR METALIZADO [114].....	62
FIGURA 5.1 ALTERNATIVAS DE ENFRIAMIENTO PARA EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR [123]. ....	67
FIGURA 5.2 ALTERNATIVAS DE ENFRIAMIENTO PARA LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR [123]. ....	68
FIGURA 5.3 PORCENTAJE DE RESISTENCIA TÉRMICA EN UN DISPOSITIVO SEMICONDUCTOR Y DISIPADOR.....	69
FIGURA 5.4 DISIPADORES. (A) TÍPICO, (B) POR AGUA, (C) VARIACIÓN DEL ÁREA DE ALETAS [126]. ....	69
FIGURA 5.5 ENFRIAMIENTO CON DISIPADOR SIN LA PLACA BASE. ....	70
FIGURA 5.6 ENFRIAMIENTO MEDIANTE PLACAS CON TUBOS.....	70
FIGURA 5.7 ENFRIAMIENTO DIRECTO EN LA PLACA BASE. ....	71
FIGURA 5.8 ENFRIAMIENTO DIRECTO EN LA PLACA BASE POR INYECCIÓN. ....	71
FIGURA 5.9 ENFRIAMIENTO DIRECTO EN LA PLACA BASE CON DISEÑO DE DISIPADOR TÍPICO.....	71
FIGURA 5.10 PLACA BASE COMO SISTEMA DE ENFRIAMIENTO. ....	72
FIGURA 5.11 ENFRIAMIENTO POR EVAPORIZACIÓN [126]. ....	72

# LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE MEDIA TENSIÓN DESARROLLADAS EN EL SECTOR INDUSTRIAL.....	6
TABLA 2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SILICIO Y CARBURO DE SILICIO PARA DISPOSITIVOS DE POTENCIA DE ALTA TENSIÓN [34]. .....	21
TABLA 2.2 IMPLEMENTACIONES DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE MEDIA TENSIÓN CON MOSFET DE SiC.....	24
TABLA 2.3 IMPLEMENTACIONES DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE MEDIA TENSIÓN CON IGBT .....	26
TABLA 4.1 PROPIEDADES LOS MATERIALES PARA LOS NÚCLEOS EN TRANSFORMADORES DE ALTA FRECUENCIA-POTENCIA [95] .....	53
TABLA 4.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE MATERIALES DIELECTRICOS [96]. .....	55
TABLA 4.3 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS REVISADAS DE LOS TRANSFORMADORES DE ALTA FRECUENCIA.....	59



## NOMENCLATURA

kV	Kilo Voltio
V	Voltio
MW	Mega Watts
kW	Kilo Watts
W	Watts
kHz	Kilo Hertz
MHZ	Mega Hertz
MVA	Mega Voltios por Ampere
kVA	Kilo Voltio por Ampere
kA	Kilo Ampere
A	Ampere
$E_g$	Banda de energía
$\epsilon_r$	Permitividad relativa
$E_c$	Campo eléctrico
$V_{sat}$	Velocidad de saturación
$\eta_i$	Concentración intrínseca
$\lambda$	Conductividad térmica
mm	Mili metro
pF	Pico Faradio
$\mu s$	Micro segundo
$\mu m$	Micro metro
C	Capacitor
R	Resistencia
$B_{sat}$	Densidad de flujo de saturación
K	Kelvin
kg	Kilo gramo
$\eta$	Eficiencia

## ACRONIMOS

CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
HV	Alta tensión
LV	Baja tensión
ESR	Resistencia serie equivalente
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada
Si	Silicio
SiC	Carburo de silicio
JBS	Diodo de barrera Schottky
BJT	Transistor de unión bipolar
EMI	Interferencia electromagnética
PCB	Tarjeta de circuito impreso
FPGA	Del inglés <i>Field Programmable Gate Array</i>
DSP	Del inglés <i>Digital Signal Processor</i>
DBC	Del inglés <i>Direct Bond Copper</i>



# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**



## Antecedentes

El incremento de la población, en los últimos años ha provocado un aumento en la demanda del uso de energía eléctrica. Debido a esto, las aplicaciones de media (entre 1kV y 50kV) y alta tensión (mayor a 50kV) [1] requieren de innovaciones en sus sistemas de transformación y distribución de energía con la finalidad de ofrecer mejores recursos a la población y además realizar uso eficiente de la energía eléctrica.

Las aplicaciones de media tensión, como sistemas de tracción y redes eléctricas inteligentes, requieren de un convertidor electrónico que esté formado por etapas de media tensión, que se interconecten con la red eléctrica, y etapas de baja tensión para proporcionar energía eléctrica a sus elementos. Se requiere de un dispositivo que proporcione el aislamiento de hasta 50kV que existe entre estas etapas [2, 3], ya que es el valor máximo para media tensión.

Anteriormente, la estructura más utilizada para la transformación y distribución de energía eléctrica en aplicaciones de media tensión era el transformador de potencia convencional conectado a un convertidor CA-CA. Este dispositivo además de ofrecer aislamiento entre las diferentes etapas de tensión, le proporciona al sistema características de robustez, eficiencia y simplicidad. Sin embargo, ante los nuevos retos que presentan las aplicaciones de media tensión el transformador no es capaz de satisfacer los requerimientos de integración con otros sistemas de media tensión, reducir el volumen, peso y costo del sistema, además presenta gran complejidad en su mantenimiento [4, 5]. La figura 1.1 muestra la estructura convencional de un sistema de tracción.

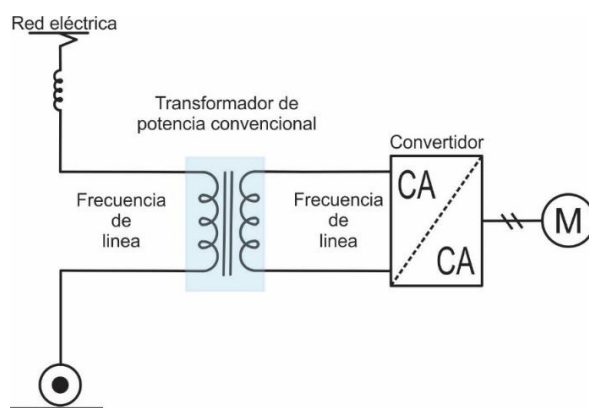


Figura 1.1 Estructura convencional del sistema de tracción.

## CAPÍTULO 1

Es por eso que en las últimas décadas investigadores en el área de electrónica de potencia han enfocado sus esfuerzos en la búsqueda de nuevas estructuras y topologías para los convertidores electrónicos de potencia que presenten las siguientes características [5-7].

- Manejo de alta potencia (MW).
- Operar en alta frecuencia (1 – 30 kHz).
- Operar con media tensión (1 – 50 kV).
- Flexibilidad para interconectarse con otros sistemas (baja o media tensión).
- Aislamiento de alta tensión.

Dentro de este marco existen cuatro estructuras básicas que cumplen los requerimientos. La diferencia entre cada estructura se basa en la complejidad de diseño y fabricación, la cantidad de elementos que requieren y las funciones que ofrecen. Es importante que todas las estructuras puedan realizar configuraciones modulares para alcanzar los rangos de tensión y corriente a los que se operan. La figura 1.2 presenta las cuatro estructuras utilizadas en la implementación de los convertidores de media tensión. En la figura 1.2(a) la conversión se realiza de manera directa sin ofrecer un bus de CD y con aislamiento entre cada etapa. En las figuras 1.2(b) y (c) existen dos etapas de transformación de la energía eléctrica, con aislamiento de alta tensión, pero sólo es posible obtener el bus de CD en baja o alta tensión, respectivamente. Por último, en la figura 1.2(d) existen tres etapas de transformación de la energía eléctrica esto proporciona la facilidad de mejorar el diseño del convertidor mediante cada etapa, cuenta con un bus de CD en alta y baja tensión lo cual facilita la interconexión con otros sistemas, y es posible realizar un aislamiento de alta tensión. Esta es la estructura más utilizada en los convertidores electrónicos de media tensión debido a las características que presenta [8-10].

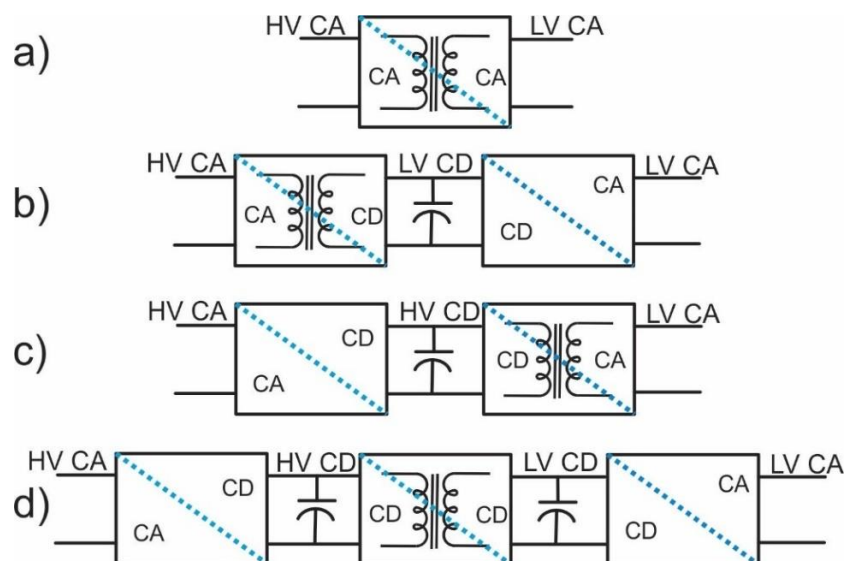


Figura 1.2 Estructuras básicas para convertidores electrónicos de media tensión. (a) Un estado, (b) Dos estados con bus CD en baja tensión, (c) Dos estados con bus de CD en alta tensión, (d) Tres estados con bus de CD en alta y baja tensión.

La figura 1.3 muestra la estructura de tres etapas, donde el convertidor CD-CD aislado es el que presenta los principales retos de implementación por sus características de tensión, aislamiento y frecuencia que deben cubrir los elementos. En este sentido, el sector industrial ha implementado diferentes topologías que cumplen con los requerimientos de potencia, tensión, frecuencia y aislamiento para las aplicaciones de media tensión.

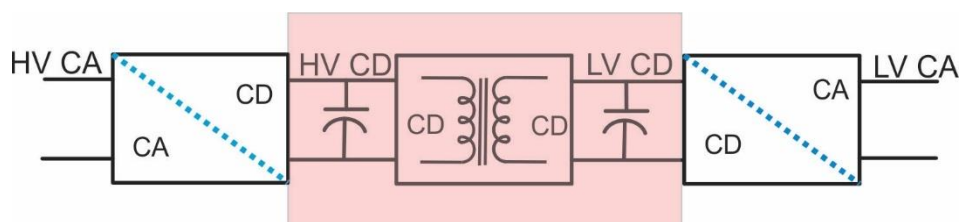
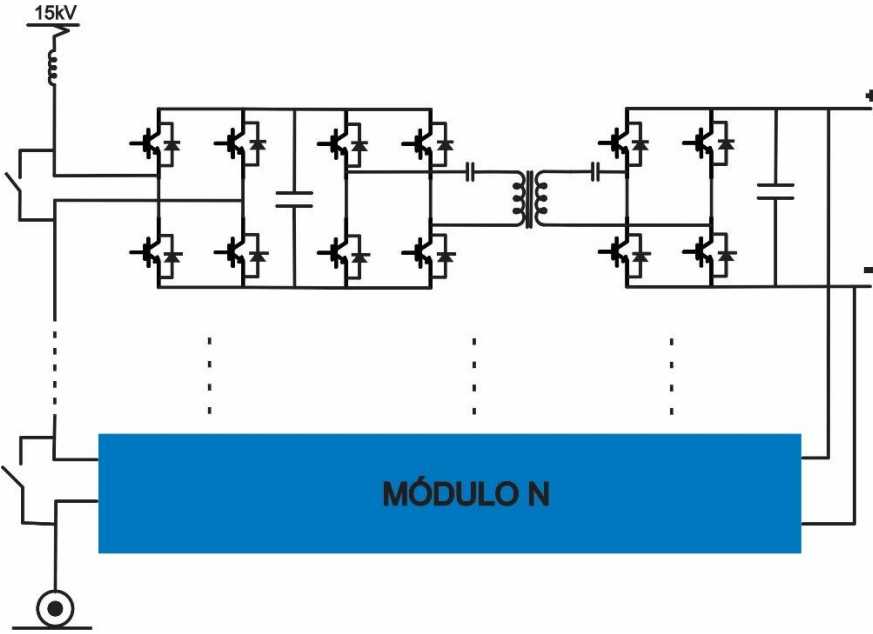
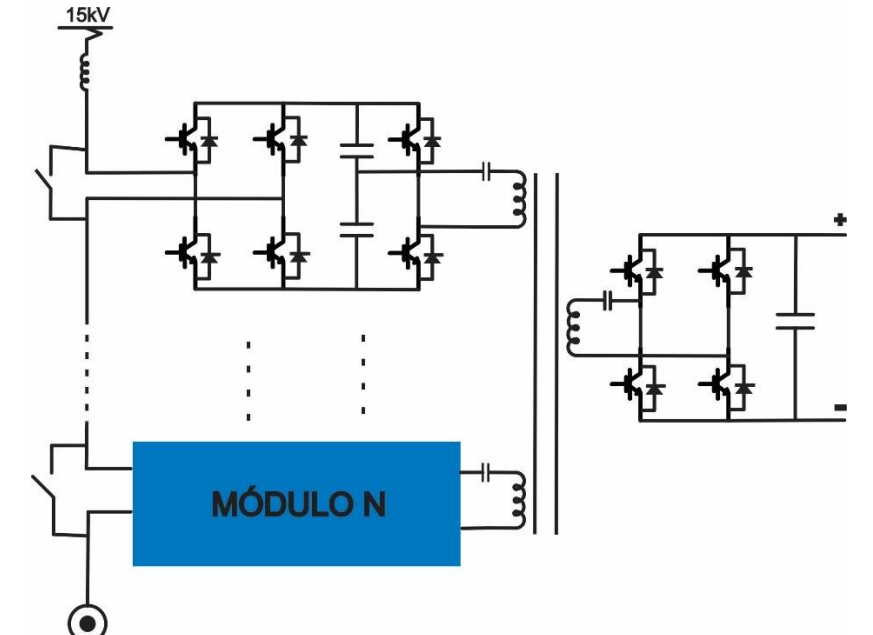


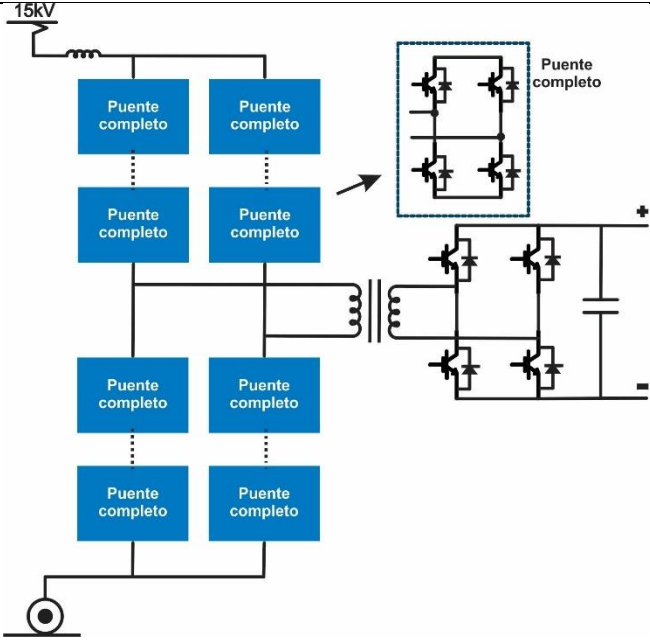
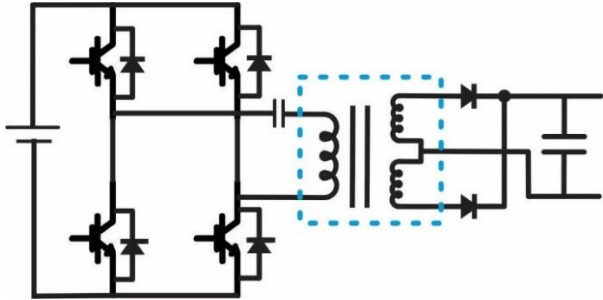
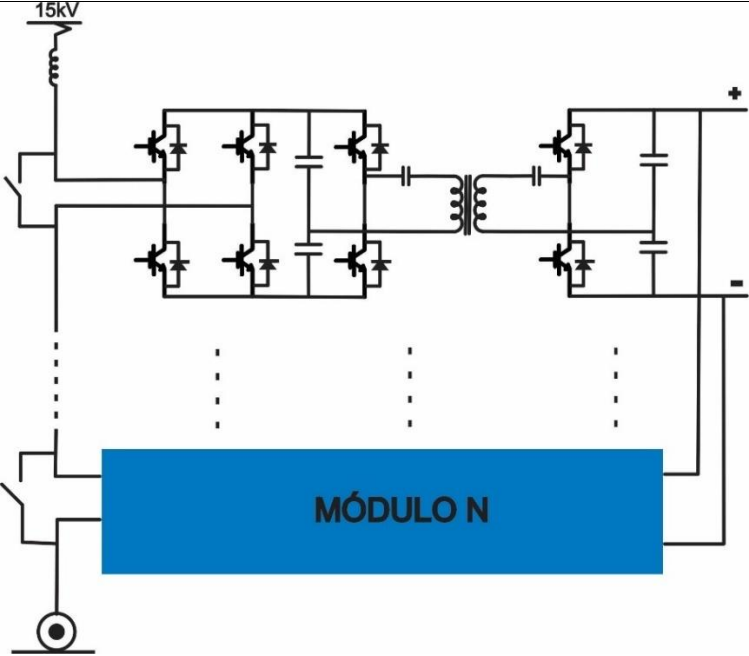
Figura 1.3 Convertidor CD - CD aislado para aplicaciones de media tensión.

La tabla 1.1 muestra las principales topologías utilizadas en el sector industrial, para los convertidores electrónicos de media tensión, esencialmente se emplean puente completo y medio puente. Es necesario resaltar que en los últimos años el desarrollo de nuevos diseños de topologías no ha presentado un gran progreso.

# CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Topologías de convertidores electrónicos de media tensión desarrolladas en el sector industrial

Características de implementación	Figura
<p>2002 [11] de ABB 4.2MVA, 12kHz 12 Módulos Resonante</p>	
<p>2003 [12, 13] de Alstom 1.5MVA, 5kHz 8 Módulos 6.5kV y 3.3kV IGBT</p>	

<p>2003-2005 [14, 15] de Siemens 2MVA, 1kHz 8 submódulos 1.2kV IGBT</p>	
<p>2010 [16, 17] de Bombardier 400kW, 25kHz 1.7kV/1kA IGBT Resonante</p>	
<p>2011 [18-20] de ABB 1.2MVA, 1.7kHz 9 Módulos 6.5kV/3.3kV IGBT Resonante</p>	

## CAPÍTULO 1

En el diseño de convertidores electrónicos de media tensión, se utilizan topologías medio puente y puente completo ya que su estructura modular les permite manejar alta potencia y frecuencia, así como realizar el aislamiento de media y baja tensión. Además de poder interconectarse con otros sistemas a través del bus de CD. Sin embargo, en muchos casos los diseños resultan voluminosos, pesados, con baja eficiencia y complejos, esto se debe a los elementos que se seleccionan para su diseño y fabricación.

El principal reto en los convertidores electrónicos de media tensión se encuentra en la selección de sus elementos para conseguir un diseño compacto, eficiente, que proporcione altos niveles de potencia y aislamiento, entre otras características [21].

Los diseñadores de convertidores electrónicos de media tensión requieren de dispositivos que bloqueen rangos de tensión de 1 a 50 kV, sin embargo los interruptores disponibles comercialmente se encuentran limitados a tensiones por debajo de los 6.5kV. Ante esta limitante se realizan arreglos en serie o modular con dispositivos de baja tensión para conseguir los rangos de operación deseados, ver figura 1.4. No obstante, este tipo de arreglos agrega volumen, peso, pérdidas y costo al diseño de los convertidores electrónicos de media tensión [22-24]. Es por eso que resulta necesario conocer las diferentes alternativas de interruptores comerciales y sus implicaciones en la implementación, así como las características de sus circuitos impulsores de compuerta y sistemas de enfriamiento.

Con la finalidad de evitar o disminuir la cantidad de interruptores utilizados en los convertidores de media tensión, los fabricantes buscan dispositivos semiconductores que bloqueen mayores rangos de tensión de los disponibles actualmente, que operen en alta frecuencia con la menor cantidad de pérdidas posibles y que además sus diseños sean compactos. Ante esta problemática la búsqueda de nuevos materiales para fabricar interruptores de media tensión resulta ser una opción atractiva para el sector industrial [25, 26].



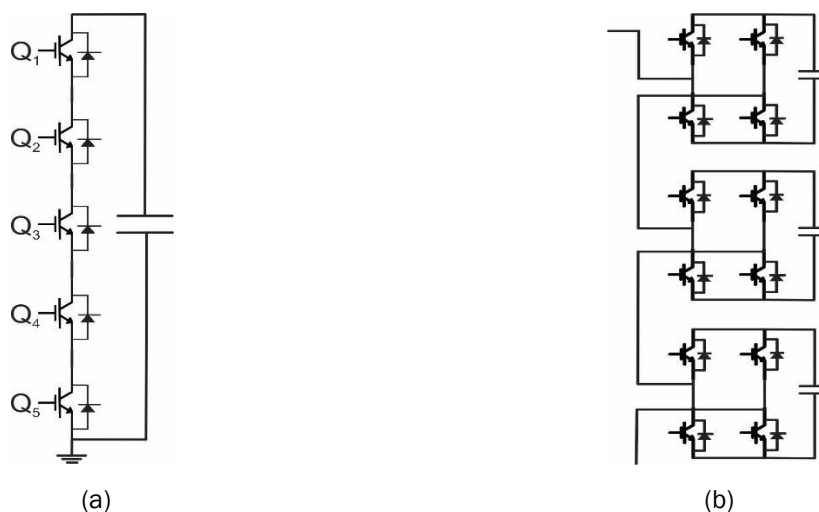


Figura 1.4 Arreglos de interruptores de baja tensión para convertidores de media tensión. (a) Serie, (b) Modular.

El principal reto en los arreglos de interruptores en serie o modulares es el aislamiento de media tensión, ya que sólo un interruptor estará referenciado a tierra y los demás interruptores, que forman el arreglo serie para alcanzar el nivel de tensión requerido, estarán flotados de la señal de tierra, ver figura 1.5. Esto impacta en el diseño del circuito impulsor de compuerta el cual debe proporcionar el aislamiento de la tensión máxima a la que está operando el conjunto de interruptores, además de sincronizar su encendido y apagado, y proveer la potencia adecuada para su operación [27].

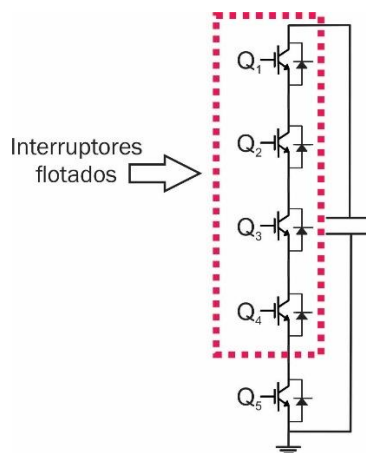


Figura 1.5 Interruptores flotados en arreglo serie para convertidores de media tensión.

Otra forma de contribuir a mejorar el desempeño de los convertidores electrónicos de media tensión es a través de la cuidadosa selección de los capacitores que forman el bus de CD ya

## **CAPÍTULO 1**

que deben operar en alta frecuencia y resistir decenas de kilovoltios. Idealmente deben ser capacitores que presenten la menor resistencia serie equivalente (ESR) ya que esto impacta en la cantidad de pérdidas del arreglo serie que se realiza para formar el bus de CD. Así mismo el diseño del transformador de alta frecuencia, cuya función principal es el aislamiento entre las etapas de baja y alta tensión, debe agregar la menor cantidad de pérdidas, volumen y peso.

Dicho de otra manera, en el diseño de convertidores electrónicos utilizados en aplicaciones de media tensión existe una vasta cantidad de topologías que tienen la capacidad de proporcionar los niveles de potencia requeridos operando en alta frecuencia. Su reto principal se encuentra en mejorar la implementación, es decir aspectos de diseño, fabricación, eficiencia y costo. Todo esto puede ser posible mediante el uso de las diferentes alternativas en los elementos que los conforman. Es por eso que más que la búsqueda de nuevas topologías el sector industrial se ha enfocado en mejorar las características y la selección de los elementos del convertidor con la finalidad de conseguir diseños eficientes, simples y compactos. No obstante, existen pocas referencias que aborden las diferentes estrategias de diseño y construcción para dispositivos semiconductores de potencia (específicamente MOSFET e IGBT), circuitos impulsores de compuerta, capacitores para el bus de CD, transformadores de alta frecuencia y sistemas de enfriamiento utilizados en convertidores de media tensión.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Identificar las diferentes alternativas en tecnologías de dispositivos semiconductores, circuitos impulsores de compuerta, elementos pasivos y sus respectivos sistemas de enfriamiento, que mejoren aspectos de eficiencia, potencia, diseño y complejidad en convertidores electrónicos de potencia de media tensión.

### ***Objetivos particulares***

- Identificar aspectos relevantes de las tecnologías utilizadas en la implementación de convertidores electrónicos de media tensión.
- Asimilar estrategias de diseño y construcción en el convertidor electrónico de potencia de media tensión.
- Definir alternativas que mejoren la eficiencia, potencia, diseño y complejidad de los convertidores electrónicos de potencia, mediante las diferentes tecnologías de sus elementos de potencia.

### **Alcances y limitaciones**

- Se revisarán las diferentes tecnologías y alternativas de los elementos utilizados para el diseño y fabricación en convertidores electrónicos de potencia para aplicaciones de media tensión.
- Se establece que es una tesis de investigación bibliográfica y que además se busca el apoyo de expertos en el tema (entre los que se incluyen contactos con autores de trabajos de la literatura técnica consultada), los cuales puedan proporcionar información de interés en los temas.
- No se construye un prototipo ni se realizan simulaciones, porque se busca obtener conclusiones mediante la bibliografía revisada y las aportaciones de expertos consultados.

### **Taxonomía de la investigación**

En esta sección se describe el proceso que se siguió para realizar esta tesis.

→ Revisar la tendencia de artículos publicados, desde el 2012 hasta el 2016, que abordan temas de nuevas topologías para convertidores electrónicos de media tensión contra aquellos que tratan aspectos de su implementación, ver figura 1.6. Las revistas en las que se realizaron las búsquedas fueron:

- IEEE Transactions Industry Applications
- IEEE Industrial Electronics Magazine

## CAPÍTULO 1

- IEEE Transactions on Industrial Electronics
- IEEE Transaction on Power Electronics
- Bodo's Power Systems.

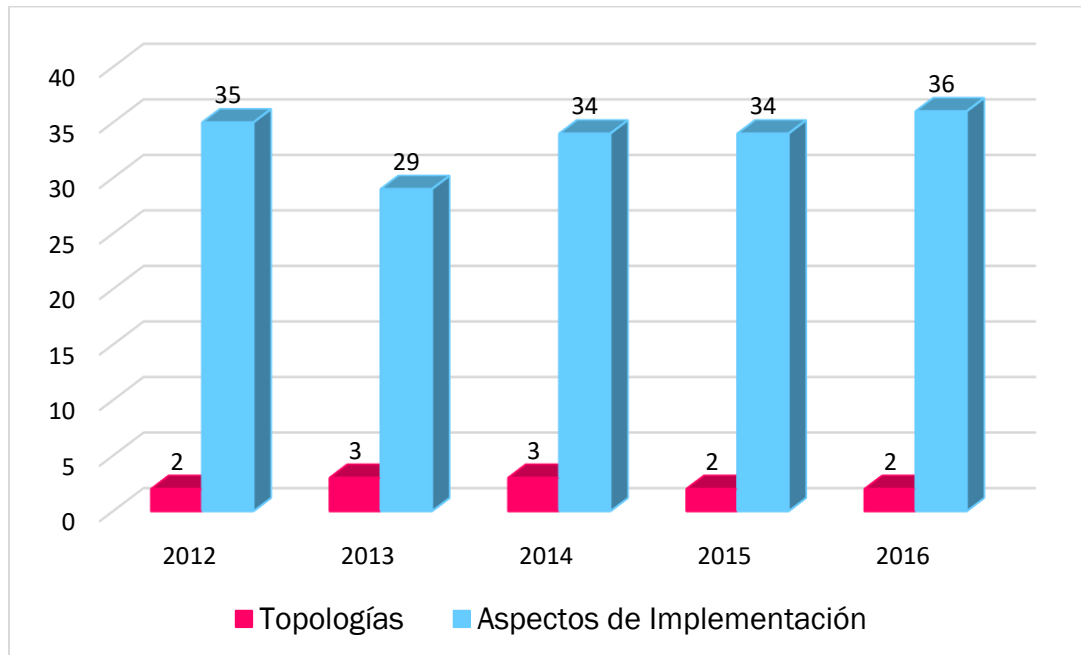


Figura 1.6 Gráfica cuantitativa de los temas que se abordan en revistas relacionadas con convertidores electrónicos de media tensión.

→ Se realizó una encuesta a diferentes investigadores expertos en el tema, se obtuvo información para ampliar y rectificar los tópicos que se revisaron en esta tesis con la finalidad de mejorar aspectos de los convertidores electrónicos de media tensión. Los investigadores que proporcionaron su respuesta a la encuesta son:

- Dr. Arturo Morales Acevedo – CINVESTAV, México.
- Dr. Edgar Robles Pimentel – Equipo de pruebas S.A. de C.V., México.
- Dr. Francisco J. Sebastián Zúñiga – Universidad de Oviedo, España.
- Dr. Hirofumi Akagi – Instituto de Tecnología de Tokio, Japón.
- Dr. Ivo Barbi – Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Dr. Mario Pacas – Universidad de Siegen, Alemania.
- M.C. Miguel Zapata – INEEL, México.
- Dr. Francisco Canales Abarca – ABB, Suiza.

- Dr. Víctor M. Cárdenas Galindo – USLP, México.

- Se limitaron los tipos de convertidores electrónicos de media tensión estudiados, mediante su tipo de estructura, rango de tensión y el tipo de elementos que utilizan.
- De acuerdo a los artículos revisados sobre los aspectos de implementación que tienen el mayor enfoque de los investigadores y el sector industrial, se hizo una clasificación de cuatro elementos que mejoran aspectos de eficiencia, complejidad, costo, diseño, etc., en los convertidores de media tensión. La búsqueda de información se hizo mediante el explorador IEEE, Bodo's Power Sysmtems, Así como revistas del sector industrial.
- Las figuras 1.7, 1.8, 1.9 y 1.10 muestran aspectos que se consideraron para buscar la información de cada tema en el que se divide la tesis.

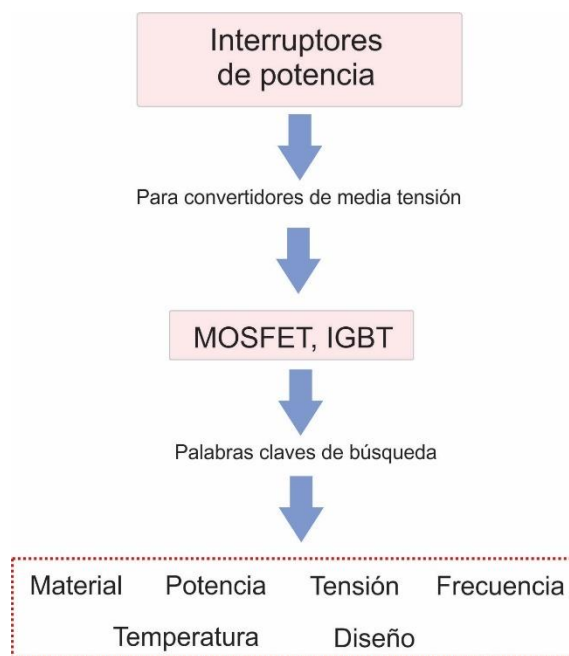


Figura 1.7 Diagrama de búsqueda para MOSFET e IGBT en convertidores de media tensión.

## CAPÍTULO 1

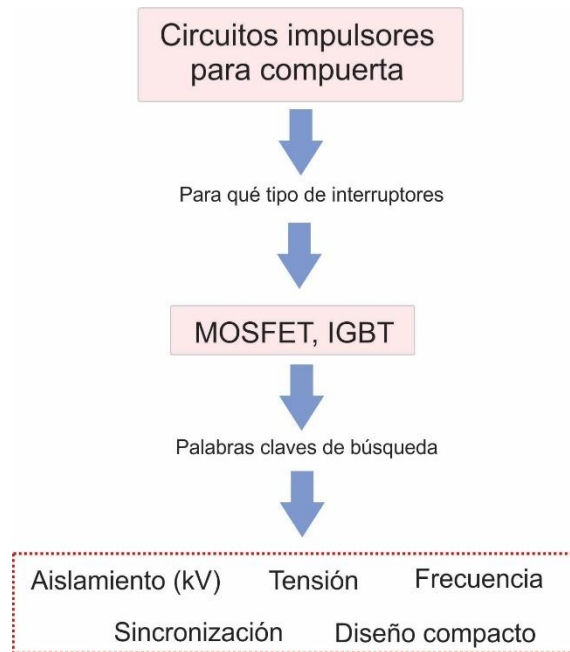


Figura 1.8 Diagrama de búsqueda para circuitos impulsores de compuerta en convertidores de media tensión.

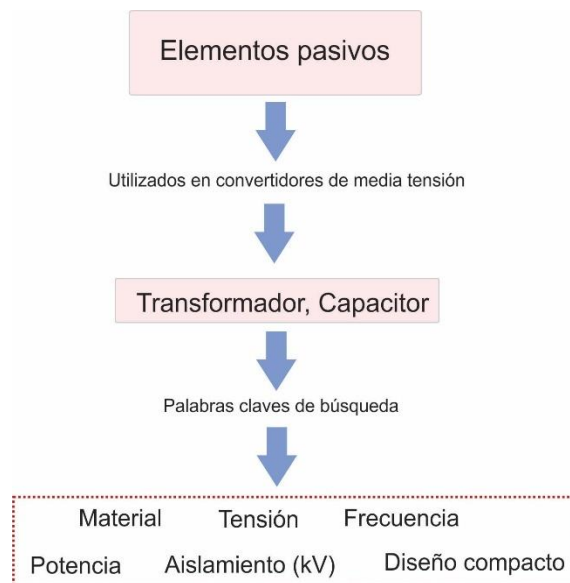


Figura 1.9 Diagrama de búsqueda para elementos pasivos en convertidores de media tensión.

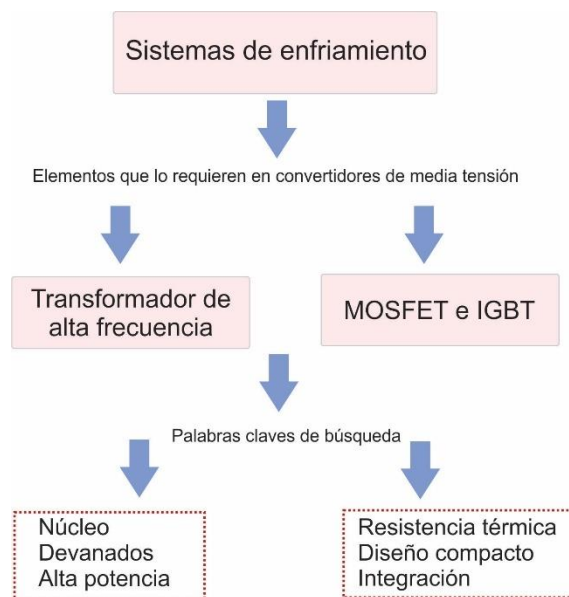


Figura 1.10 Diagrama de búsqueda para sistemas de enfriamiento en convertidores de media tensión.

→ Además de buscar artículos relacionados con los temas, se optó por solicitar información a algunos autores:

- M.C. Francisco Cazakevicius – Universidad Federal de Santa Maria, Brazil.
- Dr. Mainali Krishna – General Electric, Schenectady, Nueva York.
- Dr. Michael Leibl – ETH Zürich, Suiza.

→ Para profundizar en lo que el sector industrial hace para solucionar estos problemas se optó por tomar videoconferencias impartidas por diferentes compañías.

Estas fueron las estrategias de búsqueda y adquisición de información para realizar la revisión de los temas seleccionados que pueden mejorar aspectos de eficiencia, potencia, diseño y complejidad en los convertidores electrónicos de potencia para aplicaciones de media tensión.

## Organización de la tesis

**Capítulo 2.** Se presenta la revisión de dispositivos semiconductores de potencia, MOSFET e IGBT, los tipos de materiales disponibles para su fabricación y se realiza una comparación entre sus propiedades físicas y el impacto que tienen en el dispositivo. Se describen dos tipos de interruptores para convertidores electrónicos de potencia y se hace una breve comparación de acuerdo a los que se encontró en la literatura. También se presenta un apartado sobre los

## **CAPÍTULO 1**

retos de integración que tienen los interruptores de potencia. Al final se dan las respectivas conclusiones acerca de los dispositivos semiconductores de potencia.

**Capítulo 3.** Se enfoca en describir los requerimientos y las alternativas que existen en circuitos impulsores de compuerta para dispositivos en arreglo en serie. Se conforma de tres secciones, en la primera se muestran alternativas de aislamiento para la señal de control, en la segunda se exhiben fuentes de alimentación y en la tercera se muestran circuitos para la sincronización de interruptores. Así mismo cuenta con una sección en la que se describen los principales retos de integración para los circuitos impulsores de compuerta. Por ultimo se presentan las conclusiones del capítulo.

**Capítulo 4.** Se describen alternativas de materiales para fabricar los elementos pasivos tales como el transformador de alta frecuencia y el capacitor para el bus de CD implementados en convertidores de media tensión. También se presentan los retos de integración para cada elemento y la sección final del capítulo se describen las respectivas conclusiones.

**Capítulo 5.** Se presentan diferentes estrategias para los sistemas de enfriamiento en los transformadores de alta frecuencia y dispositivos semiconductores de potencia, ambos aplicados en convertidores electrónicos de media tensión. Finalmente se muestran las conclusiones del capítulo.

**Capítulo 6.** Se presentan las conclusiones generales del trabajo y las posibilidades de trabajos futuros.



**CAPÍTULO 2**  
**INTERRUPTORES DE POTENCIA**  
**MOSFET E IGBT**



## Requerimientos

Las topologías de los convertidores electrónicos de media tensión requieren de interruptores que bloqueen decenas de kilovoltios; sin embargo, actualmente los dispositivos semiconductores de potencia disponibles en el mercado no cubren los rangos de tensión requeridos. Es por eso que se realizan arreglos en serie o modulares de interruptores MOSFET e IGBT de baja tensión para conseguir diseños de media tensión [28].

No obstante, este tipo de arreglos impacta en aspectos de eficiencia, complejidad, costo y diseño (volumen y peso) del convertidor electrónico. Por esta razón los principales retos a los que se enfrentan los fabricantes y diseñadores de dispositivos semiconductores de potencia, MOSFET e IGBT, son [29-31]:

- Bloquear tensiones de hasta 50kV.
- Operar en frecuencias de 1 a 30 kHz.
- Tolerar altas temperaturas de operación.
- Alta eficiencia.
- Diseños compactos.

Ante esto, los desarrolladores optaron por la búsqueda de nuevos materiales para fabricar MOSFET e IGBT, los cuales tengan las propiedades físicas necesarias para ofrecer las características que se desean en las nuevas generaciones de interruptores de potencia. Actualmente el silicio (Si) es el material utilizado en la fabricación de dispositivos de potencia, sin embargo otro material conocido como carburo de silicio (SiC) está incursionando y compitiendo en el campo de materiales para fabricar dispositivos semiconductores de potencia. Este último presenta características interesantes que pueden superar las limitaciones que tiene el Si [32].

## CAPÍTULO 2

### **Materiales**

Tradicionalmente, los dispositivos semiconductores de potencia (MOSFET e IGBT) se fabrican con silicio, sin embargo las aplicaciones actuales exigen mejores desempeños (tiempo de conmutación, capacidad de manejo de corriente y tensión de bloqueo, pérdidas en operación), particularmente en convertidores electrónicos para aplicaciones de media tensión. Ante esto, los desarrolladores de estas tecnologías han incursionado en la investigación de nuevos materiales, uno de los cuales es el carburo de silicio [33, 34].

Los interruptores MOSFET e IGBT de silicio están disponibles con tensión de hasta 1.2kV y 6.5kV, respectivamente, y con limitada capacidad de corriente, frecuencia y conductividad térmica. Particularmente, la disposición de dispositivos de pocas unidades de kilovoltios hace necesario realizar complejos arreglos serie, para tener la capacidad de soportar la tensión típica de las aplicaciones de media tensión [34, 35]. La tecnología de fabricación de interruptores semiconductores con el material carburo de silicio busca esencialmente fabricar dispositivos que logren bloquear tensiones superiores a los 1.2kV y 6.5kV, para MOSFET e IGBT, respectivamente, además de disminuir pérdidas y volumen, y con ello reducir los costos de implementación de convertidores electrónicos de potencia [36]. Cabe señalar que estos dos aspectos repercuten en costos adicionales de disipadores o técnicas no convencionales de enfriamiento, y en elaborados diseños para la implementación del sistema.

En general, las ventajas que ofrecen los dispositivos fabricados con carburo de silicio son:

- Zona de deriva de un décimo comparada con la del silicio. Por lo tanto, la resistencia que exhibe durante el encendido es menor (menores pérdidas durante la conducción).
- La banda de energía es tres veces más ancha que la del silicio, lo cual disminuye el flujo de corriente de fuga y permite la operación a temperatura más elevada.
- Conductividad térmica tres veces mayor que la del silicio.

Existen diferentes estructuras para la fabricación de semiconductores con carburo de silicio, entre las que destacan 3C-SiC, 2H-SiC y 6H-SiC [37-39], pero la estructura 4H-SiC es la que presenta mejores características en cuanto a banda de energía ( $E_g$ ), campo eléctrico ( $E_c$ ), conductividad térmica ( $\lambda$ ), etc., y también es mejor cuando se compara con el silicio. Al final

se consiguen semiconductores con menor espesor en la zona de deriva, que pueden tolerar mayor nivel de tensión. Además, la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ), menor que la del silicio, decrementa el valor de la capacitancia de entrada del dispositivo el cual permite reducir las pérdidas de conmutación y los requerimientos del circuito de disparo. Por otro lado, la estructura 4H-SiC tiene mayor velocidad de saturación ( $V_{sat}$ ), por lo que los dispositivos son capaces de conmutar a mayores frecuencias. La baja concentración intrínseca ( $\eta_i$ ) le permite al dispositivo operar a mayor nivel de temperatura sin afectar, en gran medida, su desempeño. Finalmente, la conductividad térmica, esto es la capacidad para disipar el calor, es mejor, reduciendo la complejidad de los sistemas de enfriamiento. La tabla 2.1 resume las características de los materiales silicio y 4H-SiC.

Tabla 2.1 Propiedades físicas del silicio y carburo de silicio para dispositivos de potencia de alta tensión [34].

Material	$E_g$ (eV)	$\epsilon_r$	$E_c$ (MV/cm)	$V_{sat}$ (cm/s)	$\eta_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$\lambda$ (W/cm*K)
Si	1.1	11.8	0.3	$1 \times 10^7$	$1.5 \times 10^{10}$	1.5
4H-SiC	3.26	10	2	$2 \times 10^7$	$8.2 \times 10^{-9}$	4.5

Dado que la estructura 4H-SiC exhibe mejor desempeño que otras estructuras de carburo de silicio, en adelante este trabajo se enfocará únicamente a interruptores MOSFET e IGBT fabricados con esta estructura.

La figura 2.1 muestra que los dispositivos semiconductores de SiC toleran mayores niveles de tensión con menor concentración de dopado y menor espesor en la zona de deriva comparados con los dispositivos en silicio. Además es posible reducir su resistencia de encendido por un factor de diez [40].

A pesar de que la tecnología de carburo de silicio aún no está madura como la del silicio, ya existen interruptores MOSFET comercialmente disponibles de hasta 1.7kV con rangos de corriente cercanos a los 600A. Pero en el caso de MOSFET con tensiones superiores e IGBT aún no son dispositivos comercialmente disponibles, pero existen prototipos de laboratorio que se encuentran en prueba con la finalidad de explorar sus características y perfeccionarlas.

## CAPÍTULO 2

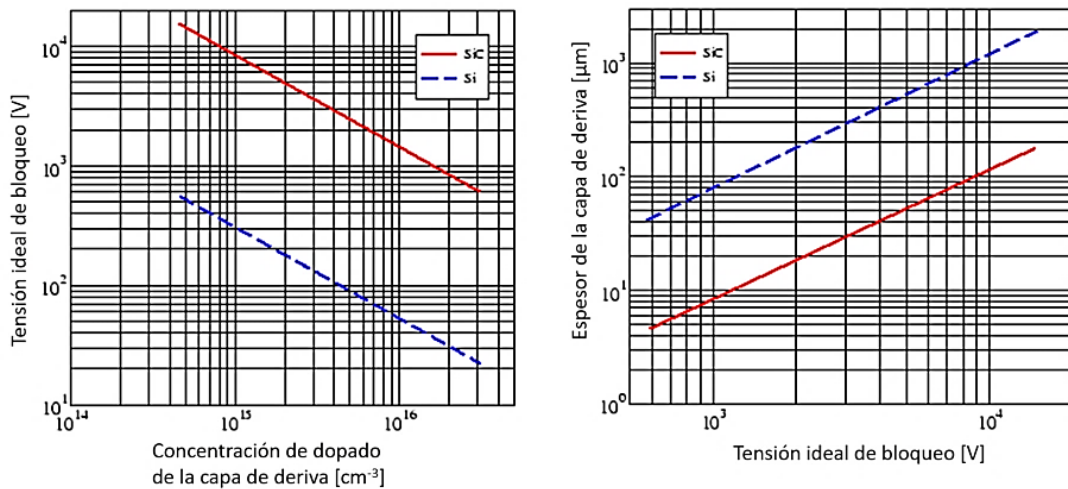


Figura 2.1 Comparación de dopado, espesor y tensión de bloqueo entre carburo de silicio y silicio [41].

### Interruptor tipo MOSFET

El interruptor MOSFET es un transistor unipolar que se utiliza para amplificar o conmutar señales eléctricas. Presenta características de control por tensión, la capacidad de conmutar a alta velocidad y presentar bajas pérdidas de conmutación. En su estructura interna tiene un diodo que se activa durante el apagado y a través de él circulan las corrientes inversas [42].

La estructura básica de construcción del MOSFET es la misma en tecnología de silicio y carburo de silicio, puede ser estructura planar o de zanja (trench). Para fines de este trabajo sólo se revisan MOSFET en SiC ya que cubren con los requerimientos que buscan los convertidores electrónicos de media tensión. La figura 2.2 muestra la estructura interna del MOSFET de 15kV de SiC con un chip de área de 8mm x 8mm, diseñado por CREE® y empaquetado por Powerex®, y un diodo JBS (*Junction Barrier Schottky*), la diferencia con un dispositivo de Si sólo es el material que se emplea para la fabricación.

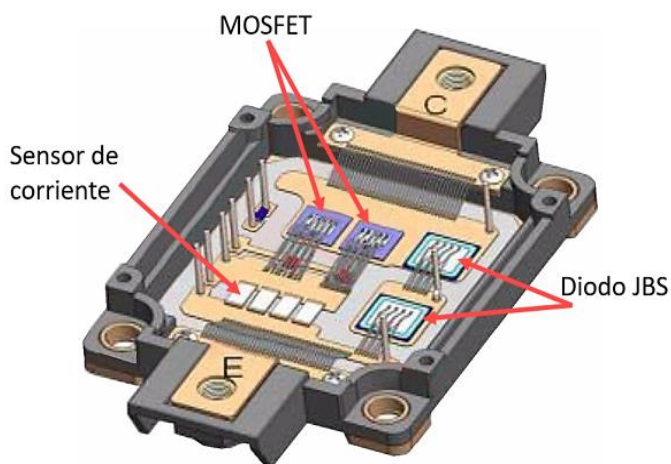


Figura 2.2 MOSFET SiC 15kV/15A [43].

Entre las características que presenta el MOSFET de SiC son que requiere menor cantidad de material para su fabricación comparado con el que necesitan los interruptores de Si, es más compacto y en general exhibe mejor desempeño. En resumen con un MOSFET de SiC se consigue:

- Mayor rango en el manejo de tensión y corriente.
- Amplio rango de frecuencia.
- Reducción de resistencias internas.
- Diseños compactos y ligeros.

Para los MOSFET de SiC la capacitancia en la compuerta oscila entre los pico y nano Faradios, esto es una ventaja porque la velocidad de carga y descarga es mayor y como resultado existen menores requerimientos del circuito impulsor. Comúnmente, la tensión del circuito de disparo es asimétrica ya que esto mejora las características de conmutación (son dispositivos de baja transconductancia y por lo tanto requieren de mayores niveles de tensión para tener un cambio en la corriente).

La tabla 2.2 lista la potencia de algunos convertidores electrónicos de media tensión que utilizan MOSFET de SiC, también se presentan las características de tensión y corriente de los interruptores. Es conveniente recalcar que comercialmente sólo existen módulos MOSFET de

## CAPÍTULO 2

hasta 1.7kV con capacidad de portar corrientes cercanas a los 600A, así que todos los dispositivos que superan esas características fueron solicitados a los fabricantes o laboratorios encargados de probar interruptores prototipo.

Tabla 2.2 Implementaciones de convertidores electrónicos de media tensión con MOSFET de SiC.

Potencia del convertidor	Tecnología	Tensión	Corriente
100kVA [44]	SiC	1.2kV	100A
9.7kW [43]	SiC	15kV	20A
10kW [45, 46]	SiC	13kV	10A
25kW [47]	SiC	MV: 10kV, LV: 1.2kV	MV: 4.7A, LV: 46A
1MW [48]	SiC	10kV	100A
250kVA [49]	SiC	1.7kV	300A

En cuanto a las frecuencias de conmutación de los convertidores electrónicos revisados y que utilizan MOSFET, son relativamente bajas (3kHz – 50kHz), sobre todo cuando la potencia de operación es mayor. En la mayoría de los casos utilizan topologías resonantes para operar a elevadas frecuencias de conmutación [50].

### Interruptor tipo IGBT

El interruptor IGBT es un dispositivo semiconductor bipolar diseñado para controlar rangos de alta potencia. Sus características de conducción son similares a las de un transistor BJT y las de excitación se comportan semejantes a las de un MOSFET.

La estructura básica del IGBT puede ser planar o de zanja (*trench*), ya sea para tecnología de Si o SiC. En su estructura interna se agrega una capa denominada buffer, ver figura 2.3, que tiene la función de limitar el campo eléctrico y la cantidad de huecos en la zona de deriva, esto ayuda a disminuir las resistencias internas y además reduce el efecto de cola de corriente (*current tail*).



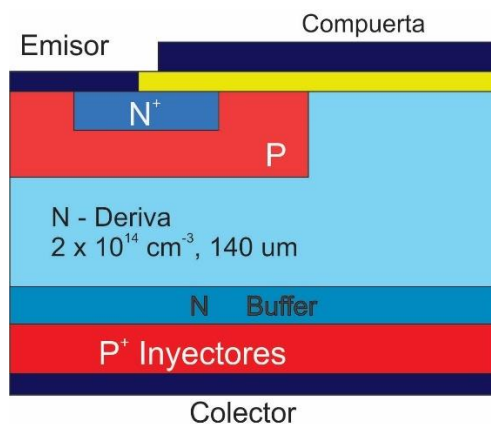


Figura 2.3 . Estructura interna del n-IGBT en SiC [51].

Para interruptores IGBT existen tres diferentes alternativas, Si, Híbrido y SiC. En la primera y tercera opción el interruptor se fabrica completamente con el material seleccionado. En el caso del interruptor híbrido, el chip del IGBT es de silicio y el diodo en antiparalelo que comúnmente se incluye en el módulo es de SiC. Cabe señalar que el interruptor tipo IGBT completamente en SiC no se encuentra disponible en el mercado, y solo se puede obtener por solicitud al fabricante.

La opción de implementar IGBT híbridos surge ante la problemática de la lenta recuperación inversa que presentan los interruptores de Si. El diodo en SiC reduce el tiempo de recuperación inversa y por lo tanto también las pérdidas.

La tabla 2.3 presenta las características de potencia de algunos convertidores electrónicos de media tensión, además exhibe los tipos de interruptores IGBT utilizados, así como sus características de tensión y corriente. Actualmente existen interruptores, Si e híbridos, comercialmente disponibles de hasta 6.5kV, no obstante para IGBT de SiC existen diferentes prototipos de laboratorio que son probados e implementados en los convertidores de media tensión con la finalidad de observar y corregir sus deficiencias.

La principal limitante para la fabricación y comercialización del interruptor IGBT en SiC es que durante su manufactura existe un defecto conocido como BPD (*Base Plate Dislocation*). Este problema se produce desde el proceso de apilar las capas del dispositivo, también afecta directamente el espesor de la zona de deriva y se incrementa cuando el dispositivo requiere

## CAPÍTULO 2

tolerar mayor tensión; el efecto que origina en los dispositivos es que aumenta la caída de tensión durante el tiempo de conducción, lo cual conlleva a tener mayores pérdidas de las que podría presentar un IGBT de Si. Por lo tanto, los requerimientos de costo y eficiencia ya no son alcanzables. Este problema también se presenta en los MOSFET, pero su efecto es menos notable por los rangos de tensión que se manejan y su estructura que los conforma. Este ha sido un motivo por el cual los IGBT de carburo de silicio aún no están disponibles comercialmente, a pesar de eso se siguen realizando esfuerzos para superar esa imperfección [52-54].

Tabla 2.3 Implementaciones de convertidores electrónicos de media tensión con IGBT

Potencia del convertidor	Tecnología	Tensión	Corriente
100kVA [44]	SiC	15kV	20A
9.7kW [43]	SiC	15kV	20A
1MW [48]	Si	6.5kV	100A
250kVA [49]	Si	1.7kV	300A
100kVA [51]	SiC	12kV	10A
	Si	6.5kV	25A
20kVA [55]	Si	6.5kV	25A
5MW [56]	Si	6.5kV, 3.3kV, 1.7kV	6.5kV ~ 50A
9.6kW[57]	SiC	15kV	40A

## **MOSFET contra IGBT**

En esta sección se presentan dos casos de estudio, en el primero se realiza una comparación de elementos comercialmente disponibles y en el segundo se comparan interruptores fabricados en SiC los cuales aún son prototipos de laboratorio.

En [48] se muestra la comparación de un MOSFET de SiC, IGBT híbrido e IGBT de Si, ambos operando bajo las mismas condiciones. En este caso el IGBT híbrido exhibe pérdidas similares al MOSFET durante el transitorio de apagado, esto se debe a que en su estructura ambos interruptores cuentan con un diodo de SiC. Caso contrario se presenta en el IGBT de Si el cual tiene las peores características en pérdidas durante el transitorio de apagado, comparadas con las de los otros dos interruptores de prueba. Aunque el IGBT híbrido y el MOSFET sean competitivos en el aspecto de pérdidas al apagado, cabe señalar que la selección entre ellos también dependerá de otros factores, como la velocidad de conmutación y el máximo nivel de tensión al que pueden operar. Por un lado, el MOSFET tiene la capacidad de operar a mayor velocidad de conmutación que el IGBT híbrido pero su disponibilidad comercial en tensión está limitada a 1.7kV, en cambio el interruptor IGBT opera a niveles de tensión de bloqueo de hasta 6.5kV.

En cuanto a los dispositivos MOSFET e IGBT en SiC operan a mayor velocidad de conmutación comparada con la que ofrecen los interruptores en Si. Sin embargo, esto conlleva a altos  $di/dt$  que impactan en problemas relacionados con el EMI, es por eso que se recomienda tomar consideraciones de protección para el interruptor ya sea mediante la adecuada selección de la resistencia de compuerta o circuitos de filtrado. Por otro lado, se prevé que el MOSFET tenga un buen desempeño operando hasta niveles de tensión de 10kV ya que a niveles superiores presenta mayores pérdidas de conducción que las de un IGBT, en particular para convertidores electrónicos que requieren operar a tensiones superiores de 10kV el IGBT de SiC será el dispositivo más adecuado [44].

En resumen, dentro de los dispositivos comercialmente disponibles para convertidores electrónicos de media tensión, el MOSFET en SiC y el IGBT híbrido presentan buenas características desde el punto de vista de pérdidas en el transitorio de apagado, con rangos

## CAPÍTULO 2

de tensión de hasta 1.7kV y 6.5kV, respectivamente. Y para el caso de diseños futuros de interruptores en SiC será posible contar con MOSFET que operen hasta 10kV e implementar IGBT para aplicaciones con niveles de tensión superior, sin embargo se requiere poner atención a los sistemas de protección para el alto EMI que podrán presentar.

### Retos de integración

La incursión de interruptores MOSFET e IGBT con mejores características (tensión, corriente, frecuencia y conductividad térmica) y de material diferente al Si, lleva a nuevos retos en el diseño de sus empaques [58-60]. Estos deben tolerar los niveles de temperatura para los que están diseñados los dispositivos de carburo de silicio, además de mejorar las técnicas de conexión entre chips y soldaduras, en algunos casos se ha optado por eliminar la conexión con cables y realizar una conexión planar [61], la figura 2.4 muestra un ejemplo de conexión planar.

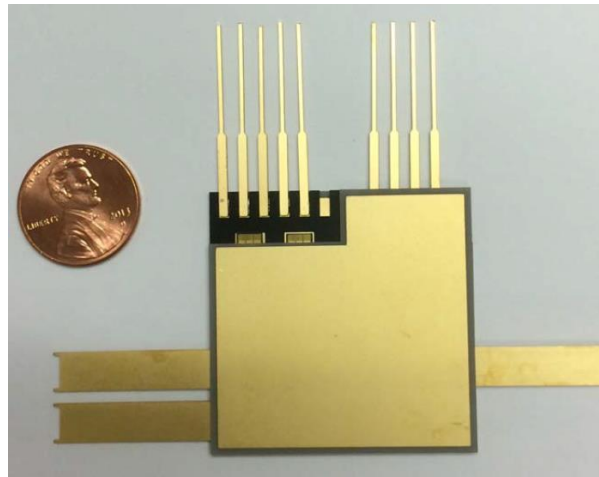


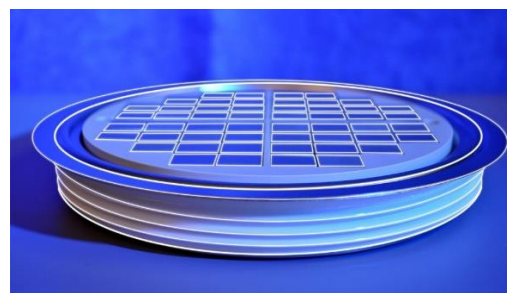
Figura 2.4 Conexión planar para interruptores de SiC [61].

Otro aspecto deseable para el empaque de interruptores de SiC, es que no incremente el valor de la capacitancia Miller ya que esto genera disturbios entre compuerta y fuente [62].

La figura 2.5 presenta los dos tipos de estructuras que existen para interruptores IGBT, módulo o de presión, la finalidad de estos diseños es tener menor complejidad en sus sistemas de enfriamiento y tolerar altas temperaturas [7].



(a)



(b)

Figura 2.5 Empaques disponibles comercialmente para IGBT (a) Módulo, (b) Presión.

Es necesario realizar diferentes esfuerzos para mejorar el diseño de empaques para las nuevas generaciones de interruptores en SiC. Además de buscar diseños compactos y que sean fáciles de integrar con otros sistemas o elementos. Si bien aún falta mejorar el diseño y fabricación de interruptores de SiC ya es un gran reto el diseño del empaque que será apto para las características que presentan.

## Conclusiones

Los interruptores MOSFET e IGBT son utilizados en convertidores electrónicos de potencia debido a los niveles de potencia que pueden tolerar, su capacidad de frecuencia y tensión de bloqueo, además del buen desempeño que presentan en aplicaciones de media tensión.

Actualmente el material más utilizado para fabricar interruptores de potencia es el Si, pero este material limita los rangos del manejo de tensión, corriente, frecuencia y conductividad térmica de los dispositivos. Estas limitaciones afectan el diseño y construcción de los convertidores electrónicos de media tensión, ante esta problemática se espera que el SiC sea el material fundamental para fabricar interruptores de potencia y así superar algunas limitaciones del Si.

Si bien aún no existen dispositivos IGBT completamente en SiC la alternativa del IGBT híbrido parece ser competitivo contra el MOSFET en SiC, ofreciendo mayores rangos de tensión. Se prevé la fabricación de interruptores en SiC que operen en rangos superiores a los que están

## CAPÍTULO 2

disponibles actualmente, esto evitará el diseño de arreglos complejos, poco confiables y costosos.

Con la nueva generación de interruptores MOSFET e IGBT será posible conseguir integración, simplicidad, alta eficiencia y el manejo de alta potencia en los convertidores electrónicos de potencia para aplicaciones de media tensión.

Los principales retos que deben solucionar los fabricantes de interruptores MOSFET e IGBT en SiC se encuentran por un lado en la fabricación (por ejemplo, el BPD) y costos del material, por otro lado no se debe pasar por alto que durante la implementación es necesario realizar una adecuada selección de la resistencia de compuerta para tener un balance entre el EMI y las pérdidas.

Algunos de los fabricantes para este tipo de interruptores son:

- WolfSpeed®
- GeneSiC®
- Semikron®
- ROHM Semiconductor®
- Microsemi®
- IXYS®

**CAPÍTULO 3**  
**CIRCUITOS IMPULSORES DE**  
**COMPUERTA**





## Requerimientos

El uso de interruptores de baja tensión en arreglos serie o modular es la solución típica para conseguir los niveles de tensión a los que operan los convertidores electrónicos de media tensión. Sin embargo, este tipo de arreglos provoca nuevos retos en el circuito impulsor de compuerta. La figura 3.1 presenta de forma esquemática el conjunto del circuito impulsor de compuerta en un arreglo serie de interruptores.

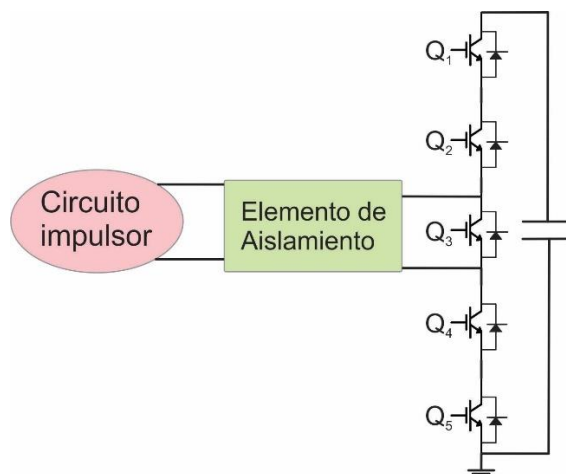


Figura 3.1 Esquema del circuito impulsor de compuerta en arreglo serie de interruptores.

La figura 3.2 muestra uno de los retos para los circuitos impulsores, que consiste en implementar un elemento que pueda aislar las decenas de kilovoltios que bloquean en conjunto los interruptores sin agregar la mayor cantidad de volumen, peso y pérdidas al sistema. La necesidad aislar la señal de control y potencia en los interruptores se debe principalmente a que sólo un interruptor estará referenciado a la señal de tierra y los demás interruptores se encontrarán flotados.

El circuito impulsor también requiere de una fuente alimentación que le proporcione la potencia necesaria para su funcionamiento y el de los interruptores.

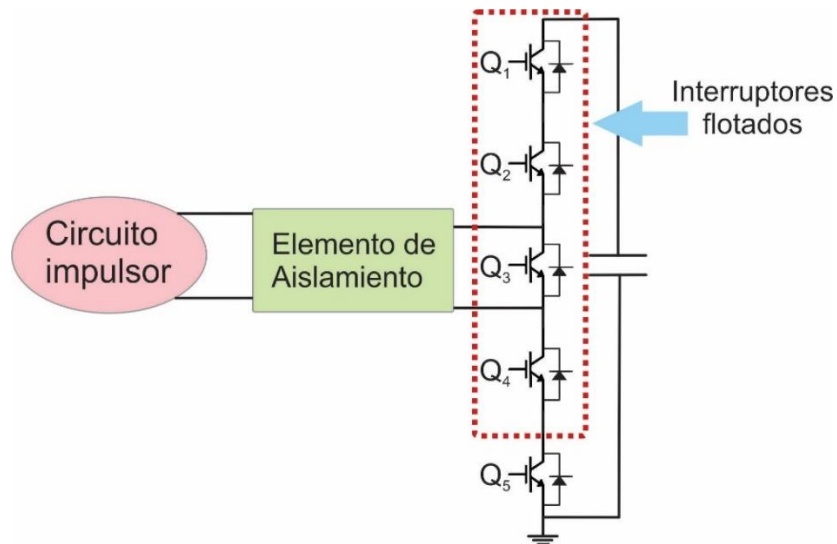


Figura 3.2 Diagrama de interruptores en serie sin referenciar a la señal de tierra.

Otro aspecto importante para el circuito impulsor es conseguir la sincronización en el encendido y apagado de los interruptores. La figura 3.3 muestra un esquema en el que un interruptor no está sincronizado con los demás, en ese momento el interruptor tendrá que tolerar la tensión total a la que está operando el sistema y sobrepasaría sus límites de tensión, lo cual puede ocasionar la ruptura del dispositivo y fallas en el convertidor.

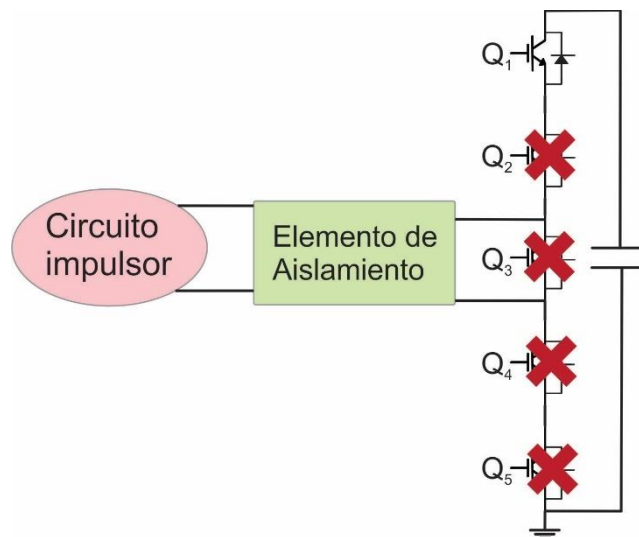


Figura 3.3 Representación de interruptores sin sincronizar.

En resumen, en los convertidores electrónicos de media tensión se requiere realizar arreglos en serie o modular con interruptores de baja tensión para conseguir bloquear los rangos de

tensión necesarios para una correcta operación. Los principales aspectos que deben cubrir sus circuitos impulsores para este tipo de dispositivos son [63, 64]:

- Aislamiento de la señal de control y potencia (Tensión superior a 1kV).
- Fuente aislada para suministrar la potencia al circuito impulsor e interruptores.
- Operación sincronizada de los interruptores.

Existen diferentes maneras de abordar los requerimientos para los circuitos impulsores de compuerta, en esta tesis se presentan las alternativas revisadas para el aislamiento de la señal de control, fuentes de alimentación de potencia y circuitos para sincronizar la operación de los dispositivos.

## Señal de control

En el circuito de la señal de control, se requiere un elemento que pueda aislar la tensión en la que operan los interruptores y que además no retrase ni distorsione la señal. Esencialmente existen dos tipos de aislamiento [65], aislamiento óptico y galvánico.

→ Opto aislamiento

Una alternativa es utilizar optoacopladores que comercialmente están disponibles para aislar tensiones de hasta 50kV. En [66] se presenta la implementación de un convertidor de 10kW que utiliza IGBT de Si de 3kV@12A y el opto OPI1268 (TT electronics®) para aislar la señal de control, el cual es capaz de aislar hasta 16kV. Otra característica de este dispositivo es que tiene una capacitancia de acoplamiento de 2pF, esto reduce la distorsión de la señal. La figura 3.4 muestra el diagrama del circuito de acoplamiento.

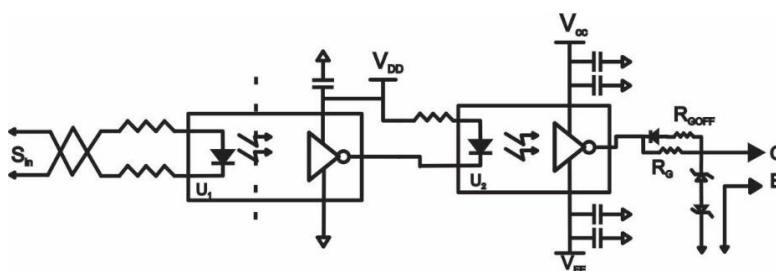


Figura 3.4 Circuito de opto aislamiento con el optoacoplador OPI1268.

### CAPÍTULO 3

Otra opción es la fibra óptica, este método es el más utilizado ya que no existe retraso de la señal, no presenta capacitancia de acoplamiento y protege contra sobretensiones dinámicas[67]. En [68] se muestra una experimentación utiliza esta opción de aislamiento; la aplicación constó de un arreglo de 8 IGBT conectados en serie y el aislamiento alcanzado es de 22kV.

→ Aislamiento galvánico

Dentro de los circuitos con aislamiento galvánico es posible encontrar dos configuraciones capacitivo y transformador.

La figura 3.5 muestra una alternativa para el aislamiento capacitivo, en la cual se utiliza el material FR-4 (*Flame Retardant por sus siglas en inglés*) como material dieléctrico entre las capas capacitivas. Con esta técnica se reduce el consumo de corriente y se elimina la dependencia de inductancias parásitas. Por otro lado, es posible obtener capacitancias de aislamiento de entre 2 y 5 pF que toleren transitorios de tensión en modo común de 10kV/ $\mu$ s hasta 400kV/ $\mu$ s [69].

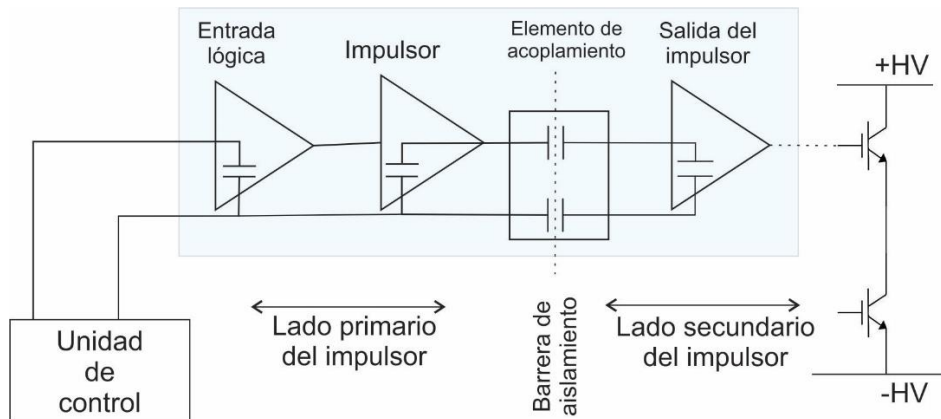


Figura 3.5 Esquema del aislamiento capacitivo.

Desde el punto de vista de aislamiento con transformador, en [70] se presenta un convertidor que utiliza MOSFET de 10kV@100A y opera a una frecuencia de 20kHz. Se consigue un aislamiento de 30kV, donde se utilizan tres transformadores, dos para aislar las señales de control y uno para la señal de potencia (se estima que consume 0.64W). La figura 3.6 presenta el diagrama a bloques del circuito con transformadores.

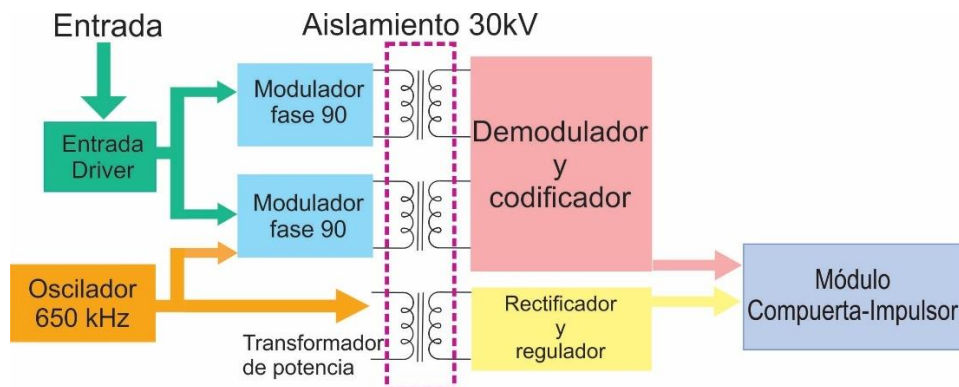


Figura 3.6 Diagrama a bloques del aislamiento de 30kV con transformadores.

Otra opción para aislamiento con transformadores se presenta en [71], el circuito impulsor opera a 1MHz, la tensión de aislamiento es de 15kV y la tensión del impulsor va desde 4.5 hasta 18V, se utiliza una topología medio puente para la transmisión de las señales, ver figura 3.7. Su principal desventaja es que no es útil para transmitir anchos de pulsos mayores a los nanosegundos, debido a la relación inductancia-resistencia que posee, y que puede saturar el inductor.

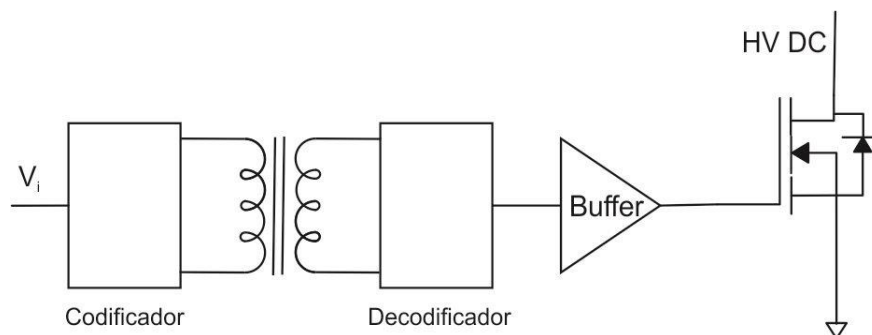


Figura 3.7 Diagrama de aislamiento con un transformador.

Consecuentemente para el aislamiento de la señal de control en convertidores electrónicos de media tensión existen dos estrategias que pueden aislar decenas de kilovoltios, la selección de cada una de ellas también dependerá del tipo de aplicación y los costos.

## CAPÍTULO 3

### Fuente de alimentación

Además de la señal de control se requiere de energía adicional para poder conmutar a los dispositivos, obviamente esta energía debe mantener el alto aislamiento.

Al diseñar la fuente de potencia para dispositivos semiconductores de media tensión se debe considerar [72-76]:

- La tensión de aislamiento.
- Frecuencia de conmutación (la energía requerida depende de la frecuencia).
- Tecnología del semiconductor.

Una alternativa para 8 IGBT que consumen 5W de potencia máxima se presenta en [68], donde el aislamiento debe ser de 22kV. La figura 3.8 presenta el diagrama del circuito donde se utilizan transformadores para aislar la tensión, su estructura está formada por un núcleo toroidal (uno por cada interruptor) y un cable de alto aislamiento que atraviesa cada uno de los núcleos. La topología utilizada para esta fuente de alimentación es puente completo.

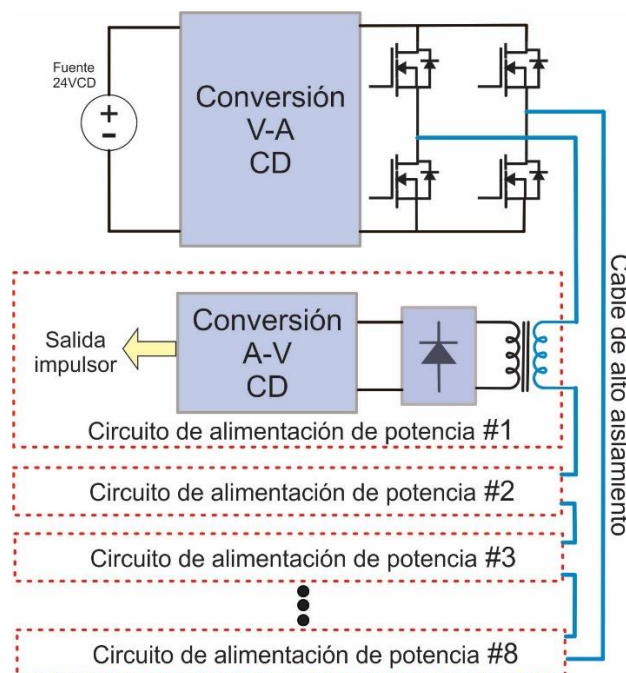


Figura 3.8 Fuente de alimentación aislada con transformador formado por núcleo toroidal y cable de alto aislamiento.

Otra alternativa en las fuentes de potencia es utilizar la topología medio puente, la cual es capaz de suministrar la energía necesaria para conmutar interruptores IGBT de 3kV, [66]. La selección de la topología se basa en un circuito que tenga baja dependencia de la inductancia

de fuga para no afectar la regulación de tensión del transformador. El aislamiento de 15kV se realiza mediante un transformador encapsulado que opera a 500kHz. La figura 3.9 muestra el diagrama de la fuente de alimentación.

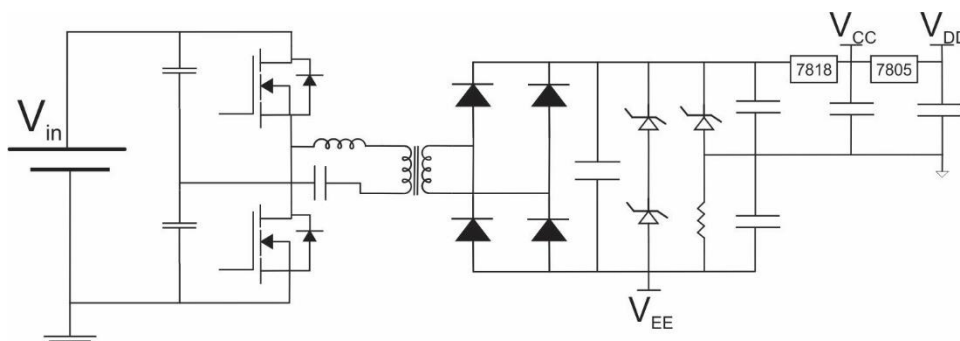


Figura 3.9 Diagrama de fuente de alimentación aislada con un transformador encapsulado.

Por último, otra opción para circuitos impulsores es el aislamiento por inductores planares, en este caso se forman por una capa de cobre de 175µm de espesor, montados en un PCB de 1.6mm de espesor, ver figura 3.10. La capacitancia parásita entre los devanados es menor a 0.8pF, esto es mucho menor que en los transformadores comunes [77, 78]. Este tipo de diseño resulta ser menos ya que sólo se requiere de un transmisor para varios receptores.

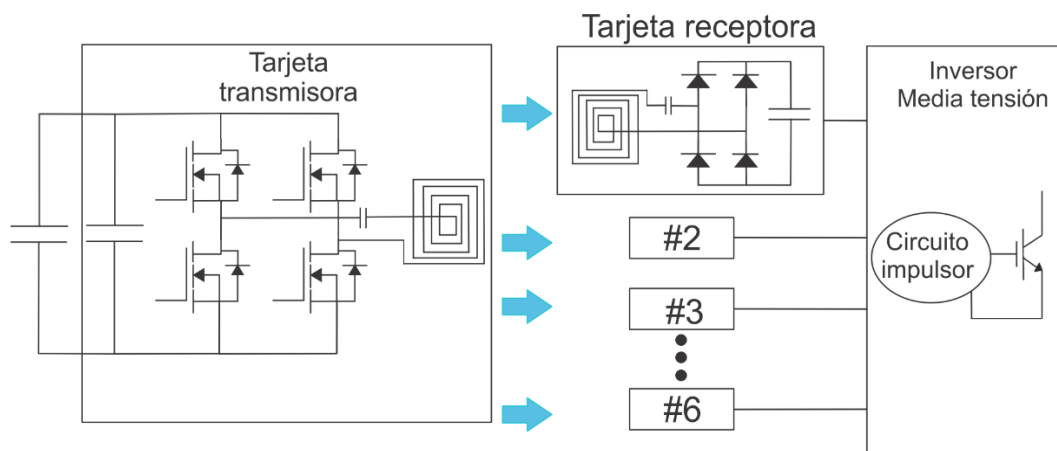


Figura 3.10 Diagrama de fuente de alimentación aislada con inductores planares.

En resumen, las topologías que más se emplean para fuente de alimentación son medio puente y puente completo, la selección de cada una dependerá del tipo de aplicación, la potencia requerida, el volumen y espacio. El aislamiento que más se utiliza es el galvánico ya sea mediante transformadores o inductores planares.

## CAPÍTULO 3

### **Sincronización de compuertas**

En convertidores de media tensión, comúnmente se recurre al arreglo de dispositivos semiconductores en serie o paralelo con la finalidad de manejar mayores niveles de tensión o corriente, respectivamente, de los que pueden tolerar de manera individual los dispositivos disponibles comercialmente[79, 80]. El principal problema en el arreglo de dispositivos en serie es el desbalance de tensión durante su estado estable y transitorio, esto se debe a que cada interruptor presenta diferentes características de capacitancia, resistencia y al retardo de la señal de control para cada uno [81]. Uno de los resultados del desbalance de tensión es que se excedan los límites de tensión del interruptor, se provoque su ruptura y por lo tanto una falla al convertidor electrónico.

Por lo que se refiere al problema de desbalance estático, está relacionado con las características de fabricación del dispositivo y es más fácil de resolver, ya que muchas veces sólo se requiere que los dispositivos sean del mismo lote de fabricación y en algunos casos un arreglo de resistencias en paralelo con el dispositivo da solución a este problema. Sin embargo, el balance dinámico demanda una solución más compleja y varias técnicas son propuestas para solucionarlo, algunas implementadas del lado de la carga (drenaje-fuente) y otras del lado de la compuerta del dispositivo [82].

Así que para mitigar los problemas de desbalance de tensión se debe considerar una cuidadosa selección de dispositivos con características similares y la sincronización en la activación de sus compuertas.

Las técnicas que se emplean para el balance dinámico de interruptores en arreglo serie se clasifican en tres categorías:

#### a) Redes de amortiguamiento pasivas

La técnica de redes de amortiguamiento pasivas consiste de circuitos formados por arreglos de resistencias, capacitores y diodos colocados en las terminales del dispositivo del lado de la carga. Su ventaja es que reducen las pérdidas de conmutación, son simples de implementar y son útiles para aplicaciones robustas. Su desventaja es que limitan la velocidad de



conmutación, pueden incrementar las pérdidas y en algunos casos el volumen y peso del circuito [83].

### b) Circuitos activos de enclavamiento

Son circuitos que en su configuración tienen diodos Zener, capacitores y resistencias, y que buscan limitar los niveles de tensión en la compuerta del dispositivo. Este tipo de circuitos no aseguran del todo el balance de tensión, son más útiles para protección de sobretensiones, además que el primer dispositivo en sujetar la tensión tendrá mayores pérdidas de potencia [84].

### c) Métodos de control activo de la compuerta

Son circuitos conformados por circuitería analógica, FPGA, DSP, entre otros. Se basan en colocar una tensión de referencia para activar la compuerta del dispositivo. Esta referencia puede variar según las necesidades del circuito con la finalidad de balancear los niveles de tensión de cada dispositivo. Su principal ventaja es que no utiliza elementos pasivos, su desventaja es la mayor complejidad de su circuitería y reducción de confiabilidad que esta alternativa presenta [85].

Es difícil determinar cuál técnica es la mejor ya que la selección depende de los requerimientos de cada aplicación, cada técnica presenta diferentes ventajas y desventajas. En esta sección se presentan algunas alternativas para los circuitos de balance de tensión dinámico.

La figura 3.11 exhibe el diagrama de capacitores de compensación para conseguir el balance dinámico a través del lado de la carga [86], donde el valor de su tensión debe ser proporcional a la tensión dinámica de cada dispositivo. En este tipo de circuitos a veces se presentan problemas de picos de tensión en el MOSFET y resulta necesario colocar un circuito de absorción.

## CAPÍTULO 3

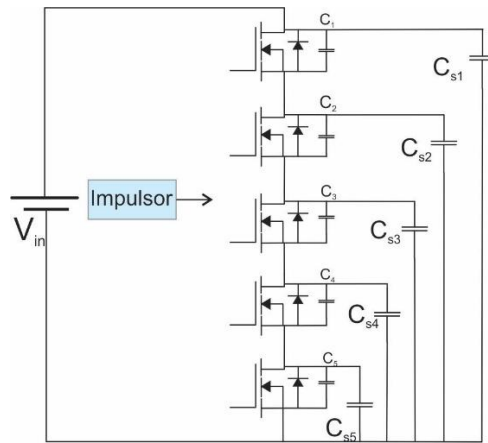


Figura 3.11 Circuito de balance dinámico con capacitores.

Uno de los principales problemas en el interruptor IGBT es el tiempo de recuperación inversa del diodo (cola de corriente) el cual en muchos casos no es el mismo para cada dispositivo y esto repercute en el balance de tensión dinámico durante el tiempo de apagado. Este efecto no se controla mediante la compuerta y una solución es incrementar el valor de la capacitancia de salida del interruptor.

Algunos circuitos que ayudan a mantener el balance de tensión en el IGBT durante el apagado se muestran en la figura 3.12. En el caso del circuito RC, figura 3.12(a), no se afecta el transitorio del interruptor, sin embargo se inducen más pérdidas por la continua carga y descarga del capacitor, también altera el balance de tensión del encendido por el aumento de la capacitancia. Por otro lado en la figura 3.12(b), el circuito RCD exhibe características similares al RC pero sus pérdidas son superiores. Otra alternativa es el circuito PC (enclavamiento pasivo), figura 3.12(c), que sólo se activa cuando la tensión entre colector y emisor excede un cierto valor, este diseño no afecta los transitorios y permite el enclavamiento de tensión durante la recuperación inversa del diodo, además se reducen las pérdidas del circuito ya que no existe descarga del capacitor durante el encendido. El circuito de la figura 3.12(d) es una modificación del circuito PC, sólo se agrega una resistencia llamada R1, esta evita que el capacitor se cargue a un valor alto en el primer pico de tensión durante la recuperación inversa del diodo y por lo tanto la disipación de energía es menor [87].

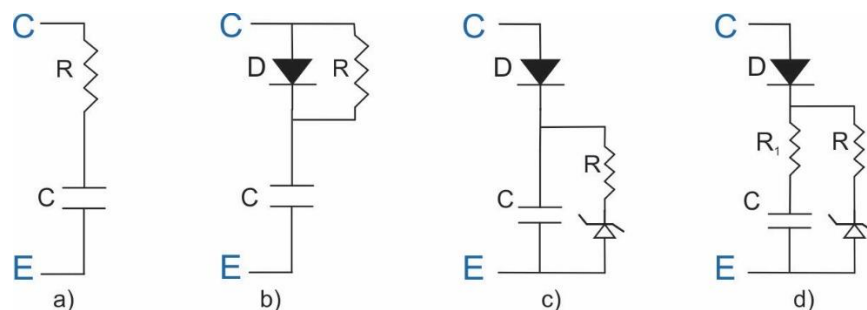


Figura 3.12 Redes de amortiguamiento pasivas para IGBT. (a) RC, (b) RCD, (c) Circuito PC, (d) Circuito modificado.

La técnica utilizada en [88] consta de dos capacitores  $C_1$  y  $C_2$  para el balance dinámico. La figura 3.13 muestra el diagrama del circuito, donde  $C_1$  determina el pico de tensión máximo de  $M_2$  y  $C_2$  se encarga del balance de tensión en el apagado. El valor de capacitancia de  $C_2$  será menor que la de  $C_1$ , con la finalidad de coincidir en los tiempos de carga ya que inician a diferentes tiempos. Se colocan diodos Zener para protección de la tensión de compuerta. Una técnica similar pero aplicada para dieciséis IGBT en serie que operan a 20kV/400A, se presenta en [89, 90].

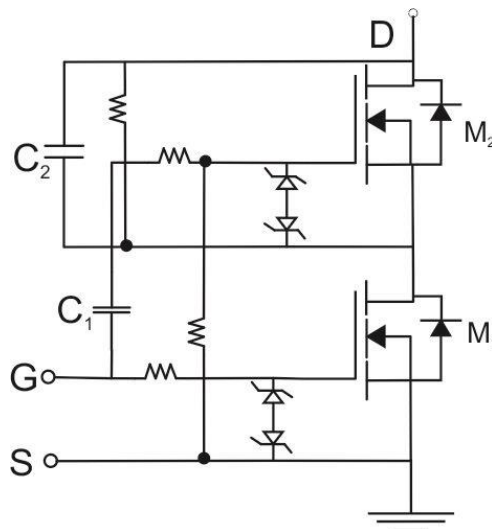


Figura 3.13 Circuito de enclavamiento para el balance dinámico en MOSFET.

Una combinación de la técnica de enclavamiento de tensión y redes de amortiguamiento pasivas para el balance dinámico se presenta en [87]. La figura 3.14 representa el diagrama bloques del circuito. Del lado de la compuerta está el circuito de enclavamiento formado por diodos Zener y resistencias; se coloca un diodo para evitar bajar impedancias, entre compuerta y colector, durante el tiempo de encendido. Del lado de la carga se emplea una

### CAPÍTULO 3

red de amortiguamiento pasiva para el balance dinámico durante el apagado del IGBT y un arreglo de resistencias en paralelo al interruptor se encargan del balance estático.

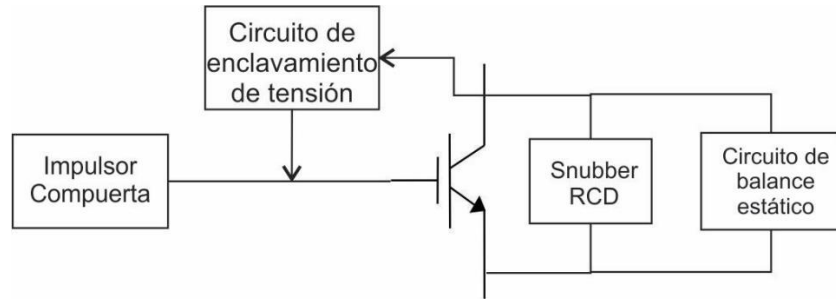


Figura 3.14 Diagrama a bloques de la técnica de enclavamiento combinada con una red de amortiguamiento pasiva.

Un ejemplo de la técnica de control activo de la compuerta, que se basa en colocar una tensión de referencia para activar la compuerta, se presenta en [91]. El principio de funcionamiento de este circuito se basa en dos controladores, local y global. El controlador local se encarga de retroalimentar la señal del transitorio  $dV_{ce}/dt$  de cada uno de los dispositivos, variar y generar la señal de referencia y disminuir el tiempo de la etapa de precondicionamiento (con la finalidad de disminuir las pérdidas) para la señal de referencia. El controlador global que consta de una FPGA se encarga de recibir las señales de retroalimentación, generar las órdenes para la etapa de precondicionamiento y determinar la disponibilidad de los dispositivos para recibir la señal de referencia. La figura 3.15 muestra el diagrama a bloques del circuito, donde se observa que la comunicación entre el controlador global y local se realiza mediante fibra óptica.

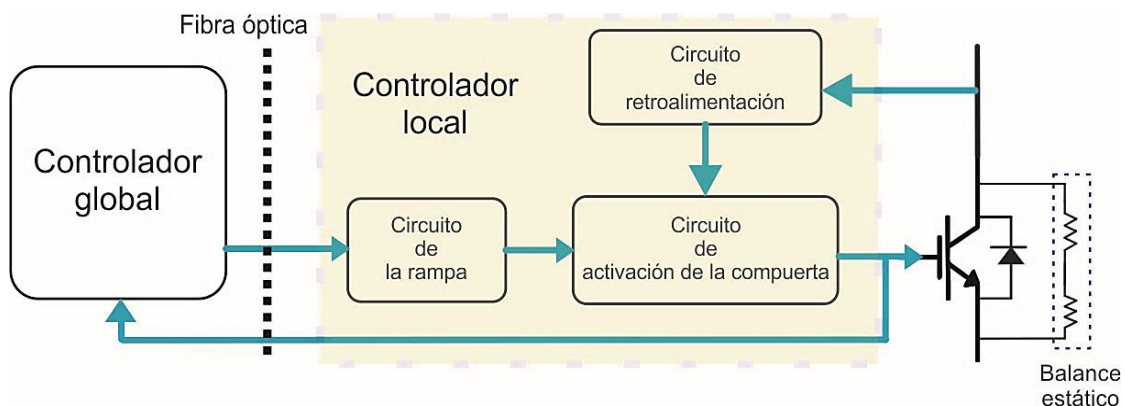


Figura 3.15 Diagrama a bloques del control activo de la compuerta para balance de tensión dinámico y estático.

La figura 3.16 presenta una alternativa para IGBT, que consta de una fuente de corriente que regula la cantidad de corriente de la fuente de tensión durante la conmutación. También existe un circuito de muestreo para la tensión y corriente del IGBT y un FPGA que se encarga de enviar las señales a la fuente de tensión, detectar el estado del IGBT y ajustar la fuente de corriente, además de comunicarse con la tarjeta de control a través de opto acopladores [92].

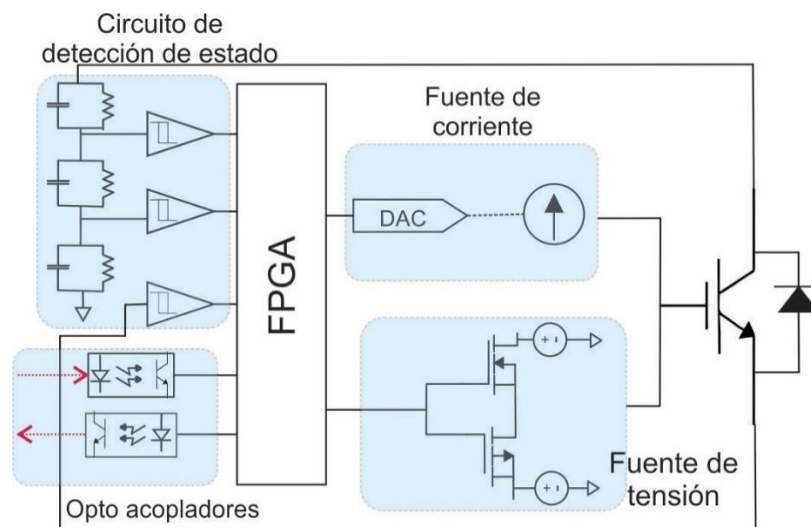


Figura 3.16 Diagrama del circuito de balance dinámico con FPGA, fuentes de tensión y corriente.

Los convertidores electrónicos de media tensión requieren del arreglo en serie de dispositivos semiconductores de baja tensión para conseguir los rangos de tensión a los que operan. Sin embargo, en este tipo de arreglos se requiere de circuitos auxiliares para lograr la sincronización de los interruptores y con ello el balance de tensión dinámico. Existen diferentes alternativas para este tipo de circuitos, pero la opción de utilizar más de una técnica en un sistema resulta más atractiva para los diseñadores debido a que tienen mayor control del comportamiento del interruptor.

## Retos de integración

Los principales retos para la integración de los circuitos impulsores en convertidores de media tensión son:

Uno de los principales retos es lograr el aislamiento de las decenas de kilovoltios para los que se diseñan los arreglos en serie de interruptores.

### **CAPÍTULO 3**

En muchos casos es recomendable utilizar circuitos integrados que protejan a los interruptores, principalmente en el caso de los de carburo de silicio ya que una de sus desventajas es que son sensibles ante la presencia de altos picos de corriente (superiores a sus valores máximos) aun cuando sea por periodos cortos de tiempo, lo cual puede llevar a una rápida destrucción del dispositivo [67].

Conseguir que la capacitancia de acoplamiento sea casi cero para disminuir las corrientes en modo común y evitar la deformación de la señal de control, es otro de los retos para este tipo de circuitos impulsores [62].

De igual manera, poder disminuir la inductancia de acoplamiento entre el circuito de potencia y el de control de la compuerta evitará que la caída de la variación de corriente ( $di/dt$ ) durante el transitorio sea más lenta e incremente las pérdidas. Esto puede lograrse si el bucle de la señal de compuerta se mantiene lo más corto posible [93].

### **Conclusiones**

Los circuitos impulsores de compuerta para interruptores en convertidores electrónicos de media tensión deben cubrir los aspectos de aislamiento, alimentación de potencia y sincronización.

Para los rangos de tensión a los que operan los dispositivos (1 – 50 kV), existen dos alternativas de aislamiento para la señal de control que son aislamiento óptico y galvánico, la selección depende del tipo de aplicación, costos y diseño particular. No obstante, es necesario mencionar que la fibra óptica ofrece mayores ventajas ya que no retrasa ni deforma la señal de control además de no agregar volumen y peso al sistema, pero desde el punto de vista de costo, es más elevado que el de las demás alternativas. Por lo tanto los principales retos para las demás alternativas de aislamiento es conseguir una capacitancia de acoplamiento casi cero, sin retraso de la señal y agregando la menor cantidad de peso y volumen al sistema.

Las fuentes de alimentación para el circuito impulsor y los interruptores utilizan topologías medio puente y puente completo, con la finalidad de disminuir volumen, peso y pérdidas se están empleando inductores planares para el aislamiento. Es importante reducir las inductancias parásitas del sistema para conseguir diseños eficientes.

Otro aspecto importante que deben considerar los diseñadores de circuitos impulsores es reducir los problemas de interferencia electromagnética (*EMI por sus siglas en inglés*), originado por la velocidad de conmutación de los interruptores y la cantidad de corriente con la que operan.





# **CAPÍTULO 4**

## **ELEMENTOS PASIVOS**



En los convertidores electrónicos de media tensión para mejorar aspectos de eficiencia, volumen, peso y costo también se requiere de una correcta selección y diseño de los elementos pasivos, como el transformador de alta frecuencia y el capacitor para el bus de CD. Los fabricantes y diseñadores proponen diferentes alternativas de construcción para este tipo de elementos, en esta sección se revisan algunas de ellas y sus implicaciones.

## Transformador de alta frecuencia

La estructura de los convertidores electrónicos revisados, consta de una etapa de media tensión (para interconectarse a la red eléctrica) y una de baja tensión (proporciona la energía a los sistemas de la aplicación); y entre ellas se encuentra un transformador de alta frecuencia (1 - 25kHz) que tiene como función principal aislar los diferentes rangos de tensión, ver figura 4.1.

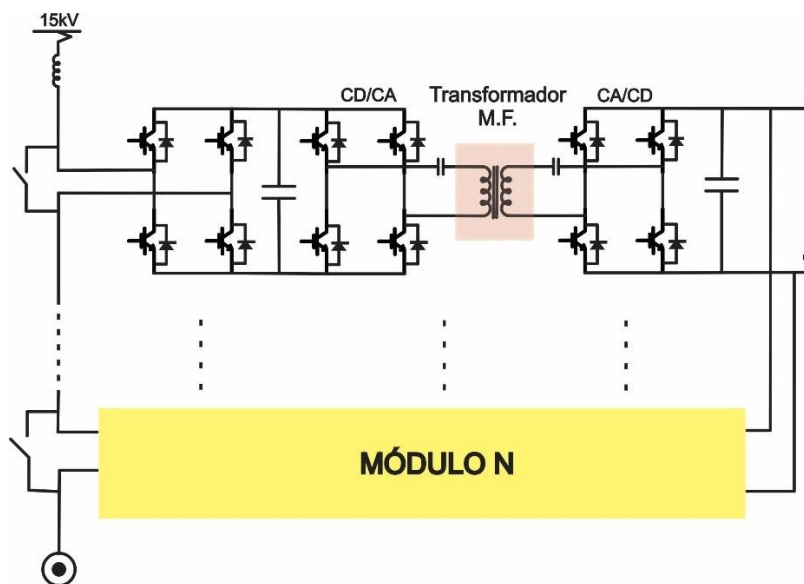


Figura 4.1 Estructura del convertidor electrónico de media tensión con transformador de alta frecuencia.

## Requerimientos

Las principales características que debe tener el transformador de alta frecuencia en los convertidores electrónicos de media tensión son [50]:

- Operar en altas temperaturas.
- Soportar alta tensión y corriente.
- Proporcionar aislamiento para media tensión.

## CAPÍTULO 4

- Operar en alta frecuencia.
- Diseño compacto.

En estos transformadores es importante controlar la cantidad de corrientes Eddy, que están formadas por pérdidas en los devanados por efecto piel y efecto proximidad; y por elementos parásitos presentes en el núcleo como en los devanados [94]. Es por eso que en esta sección se revisan alternativas para mejorar su diseño y características.

### **Núcleo**

El núcleo del transformador es el principal elemento en agregar peso y volumen. Anteriormente el material más utilizado para su construcción era la ferrita ya que presenta un buen desempeño para aplicaciones de alta potencia, pero actualmente en los convertidores electrónicos de media tensión se busca que el diseño de los transformadores sea compacto y ligero, y con reducidas pérdidas al operar en alta frecuencia; es por eso que la búsqueda de nuevos materiales para su fabricación resulta ser una idea atractiva para los diseñadores y fabricantes. El material del núcleo del transformador debe cumplir con [94]:

- Bajas pérdidas en alta frecuencia, ya que esto impacta en la eficiencia del convertidor y está relacionado con la cantidad de calor disipado.
- Elevada densidad de flujo de saturación magnético, ya que tiene estrecha relación con una mejora en el tamaño del transformador.
- Operación estable en altas temperaturas.
- Alta permeabilidad relativa, aumenta la densidad de flujo y esto se refleja en el volumen del transformador.
- Baja magnetostricción, que se relaciona con las vibraciones del transformador al someterse a un campo magnético.

Actualmente se dispone de tres tipos de materiales para la fabricación de núcleos del transformador en alta frecuencia. La tabla 4.1 muestra las propiedades físicas de cada uno de los materiales.

Tabla 4.1 Propiedades los materiales para los núcleos en transformadores de altra frecuencia-potencia [95]

Material	Ferrita	Amorfos		Nanocristalino	
Serie	3C96	2605	2705	VAC500F	Namglass4
$B_{sat}$ T	0.5	1.56	0.77	1.2	1.23
Frecuencia kHz	<400	5 ~ 100	5 ~ 250	20 ~ 200	<200
Permeabilidad	2200	4000 ~ 8000	5000 ~ 50000	20000 ~ 30000	10000 ~ 100000
Temperatura de operación continua °C	>240	395	365	600	570

Las mejores características de diseño las presenta el material nanocristalino, ofrece menores pérdidas en el núcleo, alta densidad de flujo de saturación que proporciona diseños más compactos comparados con los de otros materiales y además tiene buena estabilidad cuando opera en altas temperaturas, no obstante su principal desventaja es el costo del material, además de que sus estructuras están limitadas a formas toroidales. Por otro lado la ferrita es el caso opuesto del material nanocristalino, ya que sus diseños son pesados y voluminosos, no tienen buena estabilidad en altas temperaturas pero sus ventajas son que tiene una gran variedad de estructuras comerciales y de bajo costo. Actualmente el material que más se utiliza, para la fabricación de núcleos en los transformadores de alta frecuencia, es el amorfo porque desde el punto de vista de volumen, peso, pérdidas y estabilidad en alta temperatura exhibe mejores características de las que ofrece la ferrita; además comparado con el nanocristalino, su costo es menor y tiene una gran de estructuras comercialmente disponibles [96-98].

En transformadores de alta frecuencia, existen tres alternativas de estructuras para los núcleos, la disponibilidad de la estructura depende del tipo de material seleccionado. La figura 4.2 presenta las estructuras disponibles: *Core*, *Shell* y matriz, respectivamente.

## CAPÍTULO 4

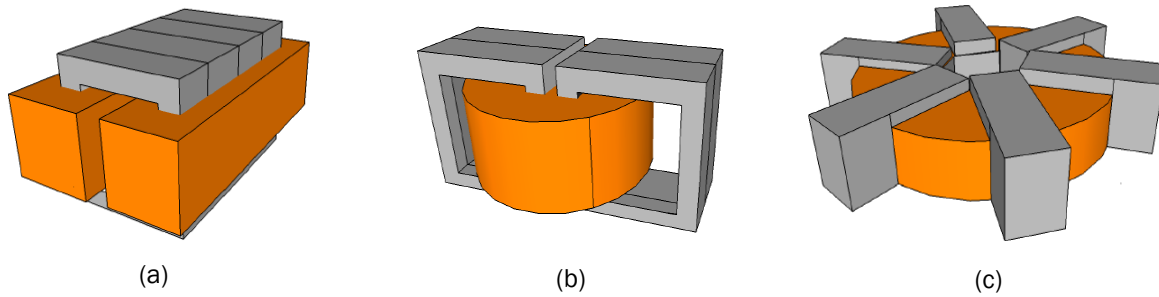


Figura 4.2 Estructuras para transformadores de alta frecuencia - potencia. (a) Core, (b) Shell, (c) Matriz [63].

La estructura tipo Core cuando opera en alta potencia tiene bajas pérdidas y sus diseños son compactos, pero presenta baja conductividad térmica en sus materiales de aislamiento. La estructura tipo Shell es ideal cuando los requerimientos que se desean son buena conductividad térmica, tamaño reducido y bajas pérdidas, en rangos de media tensión y frecuencia. La estructura tipo matriz consta de un arreglo de núcleos en serie o paralelo, es útil para aplicaciones de alta tensión [63, 99].

### Devanados

Los devanados del transformador de alta frecuencia son los principales en agregar pérdidas por efecto piel o proximidad, por lo que el principal reto para los diseñadores es reducirlas. Entre otros aspectos que deben cubrir los devanados están [100]:

- El manejo de alta tensión y corriente.
- Alta disipación de calor.
- Alto factor del llenado de la ventana.

Los tipos de devanados que se utilizan para fabricar los transformadores de alta frecuencia son, hilo de litz o placas de cobre [96, 101]. El primero ofrece la ventaja de reducir el problema de efecto piel, que está relacionado con el aprovechamiento total del área del conductor, al grado de ser un efecto despreciable gracias a que son múltiples cables de pequeña sección aislados unos de otros. Sin embargo, sus desventajas son que los calibres comercialmente disponibles están limitados, tiene un bajo factor de llenado de la ventana y limitada conductividad térmica, y su costo es elevado. El segundo tipo de devanado ofrece diseños con grosor inferior a los  $16\mu\text{m}$  esto mejora el factor de llenado de la ventana, además tiene un

buen desempeño térmico y es de bajo costo. Su principal reto es el efecto proximidad, que se refiere a una incorrecta distribución de la corriente a través del conductor produciendo un aumento de la resistencia [102-104].

Comúnmente, el material que se utiliza para la construcción de los devanados es cobre aunque también existen otras alternativas como oro y aluminio. El menor costo es el aluminio por eso es una alternativa interesante a pesar de tener un 64% más de resistividad que el cobre, pero si la aplicación está limitada en costo y peso el aluminio es la opción más atractiva Sin embargo, sus principales desventajas son que no es compatible con las soldaduras comunes y está limitado en calibres comercialmente disponibles [102].

Otro aspecto importante en el diseño y construcción del transformador es el material dieléctrico. Sus principales funciones son aislar al núcleo de los devanados y disipar el calor entre ellos [100]. La tabla 4.2 presenta las propiedades físicas para algunos materiales dieléctricos que se utilizan para fabricar transformadores de alta frecuencia.

Tabla 4.2 Propiedades físicas de materiales dieléctricos [96].

Material dieléctrico	Conductividad térmica (W/m*K)	Rigidez dieléctrica (kV/mm)	Constante dieléctrica $\epsilon_r$
Aire (@70°C)	0.03	3	1.0005
Resina epoxi	0.25	15	3.6
CoolPoly-D5108	10	29	4.8
Mica	0.71	11-43	2.5-7
Aceite	0.12	10-15	2.2-2.5
Papel	0.05	22-49	2.3-5
NOMEX	-	27	2.5-4

## CAPÍTULO 4

Principalmente el material dieléctrico debe tener bajas pérdidas dieléctricas, alto valor de rigidez dieléctrica y conductividad térmica [94]. La selección de este material depende de las características de la aplicación, sin embargo, es común utilizar el aceite o la resina.

### Alternativas implementadas

En esta sección se muestran algunos diseños de transformadores de alta frecuencia que se han implementado por diferentes investigadores. Se especifica sus rangos de potencia, frecuencia, tensión de aislamiento, entre otros.

La figura 4.3 presenta el transformador de alta frecuencia diseñado para 350kW, que opera a 10kHz. Su peso es de 50kg, y el diseño consta de un núcleo amorfo, con configuración coaxial en los devanados para evitar una construcción robusta. La cantidad máxima de pérdidas es menor a 2500W, tiene una eficiencia de 99.28%. Su sistema de enfriamiento es por canales utilizando agua desionizada [11].

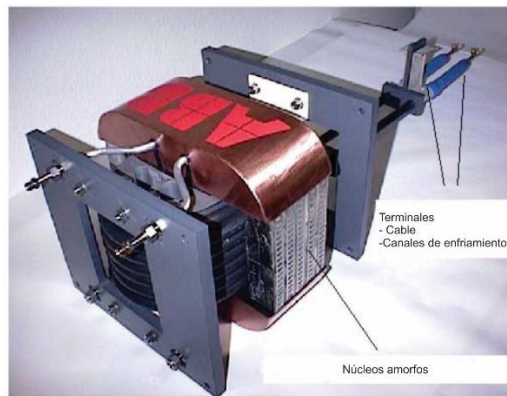


Figura 4.3 Transformador de 350kW@10kHz diseñado por ABB® [11].

En [105] se presenta el diseño de un transformador de 500kW, que opera a 8kHz y tiene un peso de 18kg. El núcleo es de material nanocristalino y el sistema de enfriamiento consta de tubos de aluminio que transportan agua desionizada. Alcanza una eficiencia de hasta el 97%.

La figura 4.4 representa una sección del transformador que se diseña en [18], consta de nueve celdas de 150kVA cada una que operan a 1.7kHz. Los núcleos son de material nanocristalino y los devanados de hilo de litz. Para este diseño se utilizan tres tipos de



sistemas de enfriamiento, se utiliza aire forzado, por agua desionizada y se sumerge todo el transformador en aceite. Es diseñado por ABB® y tiene una eficiencia del 98%.

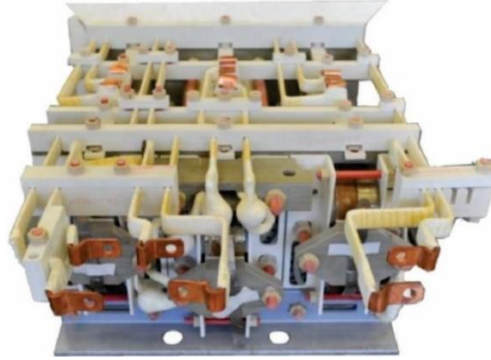


Figura 4.4 Celda de 150kVA@1.7kHz para un convertidor de 1.2MVA [18].

El diseño de dos transformadores de 1MW, que operan a 20kHz se presenta en [106]. La figura 4.5(a) muestra el primer diseño que utiliza 20 núcleos de ferrita con devanados de hilo de litz, sus pérdidas son de 161W y 230W, núcleo y devanados, respectivamente. El aislamiento se realiza mediante una especie de bobina PTFE (politetrafluoroetileno) y el sistema de enfriamiento es por aire forzado. Tiene una eficiencia del 99.96%. La figura 4.5(b) presenta el diseño del segundo transformador, su diseño consta de núcleos nanocrystalinos y devanados de hilo de litz con grosor de  $0.71\mu\text{m}$ . La ventaja de este transformador es que tiene menor volumen y peso que el primero. El sistema de enfriamiento consta de placas de aluminio que posteriormente se conectan a disipadores enfriados por agua. Alcanza una eficiencia de 99.72%.

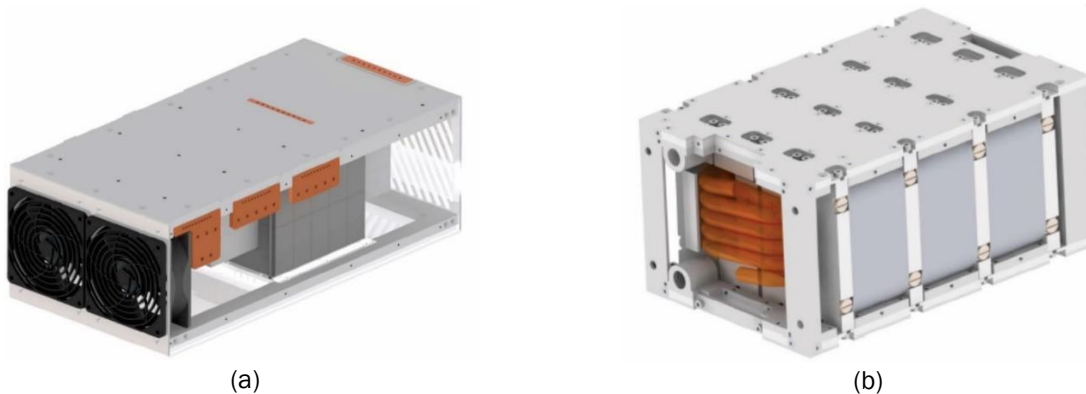


Figura 4.5 Transformador de 1MW@20kHz. (a) Con núcleo de ferrita, (b) con núcleo nanocrystalino [106].

En [107] se presenta el diseño de tres transformadores que utilizan núcleos nanocrystalinos, se busca mejorar aspectos de volumen, peso y eficiencia.

## CAPÍTULO 4

El primer diseño consta de un núcleo tipo core, el devanado de baja tensión está formado por dos placas de cobre de 0.3mm y el de alta tensión con hilo de litz. Entre devanado primario y secundario hay un aislamiento de 20mm hecho con resina, esto proporciona un diseño compacto, ver figura 4.6. El enfriamiento se hace por convección mediante placas para el lado de alta tensión y por agua para todo el sistema. Presenta una eficiencia de 99.72%.

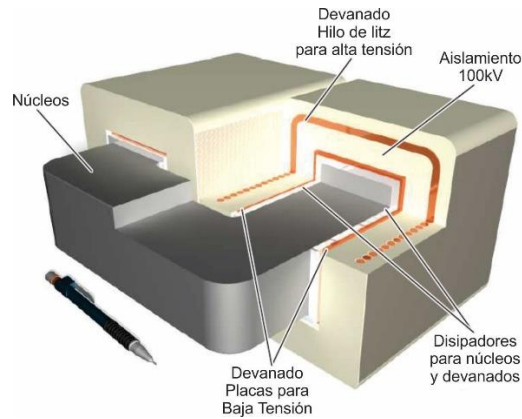


Figura 4.6 Transformador con núcleo tipo Core [107].

El segundo diseño emplea un núcleo tipo Shell, los devanados de baja tensión son de placas de cobre con grosor de 0.5mm y en el lado de alta tensión se utiliza cable HV que puede resistir un aislamiento de 100kVDC, este se coloca alrededor de las placas. Debido al uso del cable HV se incrementa el tamaño de manera drástica. El transformador utiliza disipadores enfriados por agua para devanados y núcleos, además de ventiladores los devanados de alta tensión, ver figura 4.7. Alcanza una eficiencia de 99.62%.

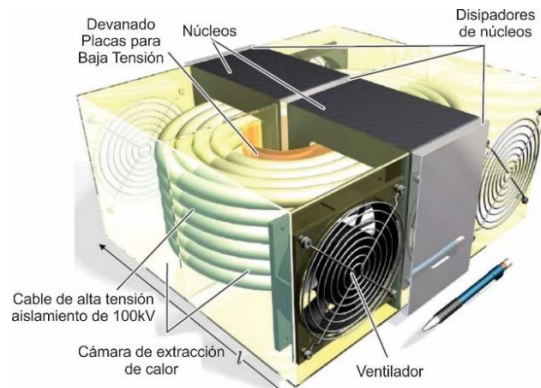


Figura 4.7 Transformador con núcleo tipo Shell [107].

El ultimo diseño utiliza un arreglo conocido como matriz, que consta de varios núcleos conectados en serie o paralelo según sea el diseño. Los devanados de baja tensión emplean

placas de cobre con un grosor de 0.3mm y los de alta tensión se forman con cable HV. Cada núcleo utiliza disipadores enfriados por agua y los devanados de alta tensión utilizan aire forzado, ver figura 4.8. Este transformador tiene una eficiencia de 99.54%. Sus ventajas son que requiere poco cable para el devanado de alta tensión y esto reduce la complejidad y el tamaño de construcción, también existe mejor distribución de la corriente y es útil para aplicaciones de alta potencia.

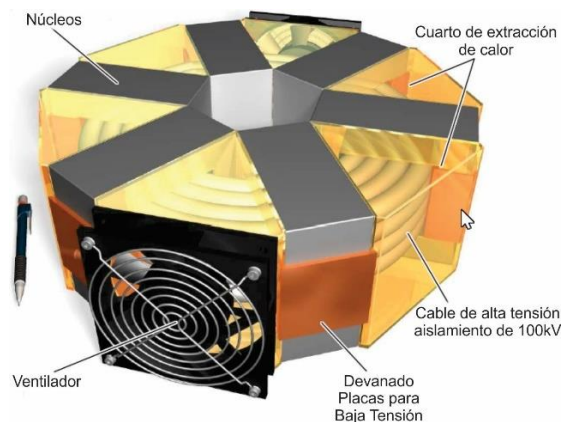


Figura 4.8 Transformador con núcleo matricial [107].

La tabla 4.3 presenta un resumen de las características de los transformadores revisados en esta sección.

Tabla 4.3 Resumen de las características revisadas de los transformadores de alta frecuencia.

Características								
Potencia	350kW	500kW	150kVA	1MW	1MW	1MW	1MW	1MW
Frecuencia	10kHz	8kHz	1.7kHz	20kHz	20kHz	20kHz	20kHz	20kHz
Aislamiento	3kV	15kV	15kV	-	-	100kV	100kV	100kV
Peso	50kg	18kg	-	-	-	-	-	-
Núcleo	A	N	N	F	N	N	N	N
Devanado	Cable	Cable	Litz	Litz	Litz	Litz - AT	Cable - AT	Cable - AT
	Cobre	Cobre	-	Cobre	Cobre	Placa -BT	Placa -BT	Placa -BT
$\eta$ (%)	99.28	97	98	99.96	99.97	99.72	99.62	99.54

## CAPÍTULO 4

### Capacitor para el bus CD

En los convertidores electrónicos de media tensión, otro elemento pasivo que requiere de una adecuada selección es el capacitor para el bus CD, esencialmente existen dos tipos de bus, de alta tensión y baja tensión, ver figura 4.9. Sin embargo, en la mayoría de los casos se realizan arreglos de capacitores en serie para alcanzar los rangos de tensión a los que opera el sistema [108].

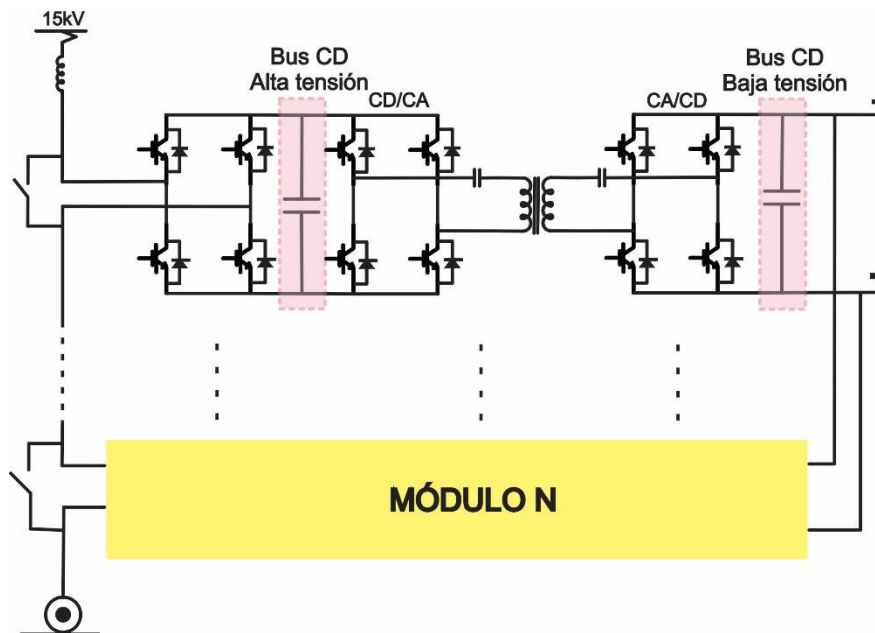


Figura 4.9 Bus de CD en un convertidor electrónico de media tensión.

### Requerimientos

Para la selección de los capacitores que conforman el bus de CD es necesario considerar que deben contar con los siguientes aspectos [109].

- Operar con altos niveles de tensión y alto rizo de corriente.
- Baja inductancia serie, esto limita los voltajes transitorios de conmutación.
- Operar en alta frecuencia.
- Operar de manera estable en altas temperaturas.
- Larga expectativa de vida, esto se refiere a la cantidad de horas que puede operar de manera continua.
- Bajo factor de disipación
- Baja resistencia serie equivalente.

## Capacitor de película de polipropileno metalizada

Existen tres tipos de capacitores que cubren algunos de los requerimientos deseados para el bus de CD, capacitor electrolítico de aluminio (Al-cap), capacitor de película de polipropileno metalizada (MPPF-cap) y capacitor de cerámica metalizada (MLC-cap). La figura 4.10 presenta una comparación cualitativa de las características de cada uno los capacitores [110].

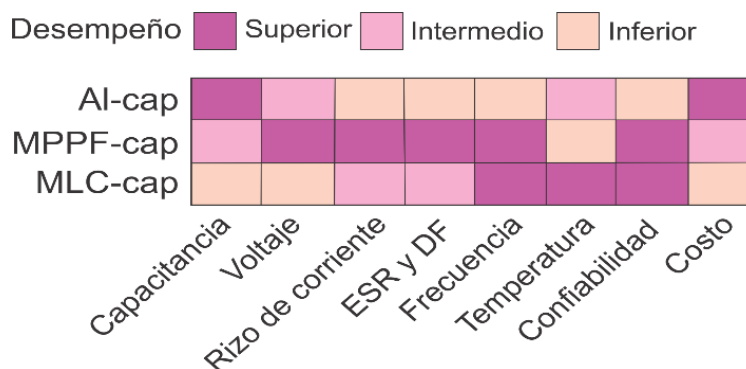


Figura 4.10 Comparación cualitativa de los tipos de capacitores para el bus de CD en convertidores electrónicos de media tensión [110].

De las opciones disponibles en capacitores, el que tiene mejores características es el capacitor de película de polipropileno metalizada y es el más utilizado en convertidores electrónicos de media tensión. Sus principales ventajas son [109, 111, 112]:

- Independencia de la polaridad
- Baja Resistencia Serie Equivalente (*ESR Siglas en inglés*)
- Bajo factor de disipación
- Operar estable hasta 105°C
- Operar en alta frecuencia
- Tiempo de vida mayor a 100,000
- Autoprotección ante fallas

Utilizar capacitores de película reduce el número de componentes en el arreglo serie y aumenta la expectativa del tiempo de vida del equipo [113]. El volumen del capacitor se encuentra estrechamente relacionado con el espesor del dieléctrico, es por eso que varios fabricantes buscan disminuir su espesor sin afectar los niveles de tolerancia en tensión.

## CAPÍTULO 4

El proceso de metalización se realiza mediante evaporización de materiales como aluminio y zinc. La figura 4.11 muestra la estructura interna de la parte metalizada, está segmentada con la finalidad de ofrecer mayor seguridad durante su operación [114]. Durante una falla, la segmentación funciona como un interruptor que se abre y esto evita dañar por completo el capacitor, es decir sólo se modifica el valor de la capacitancia pero no el funcionamiento del capacitor, con el paso del tiempo este valor sirve para determinar el estado del capacitor.

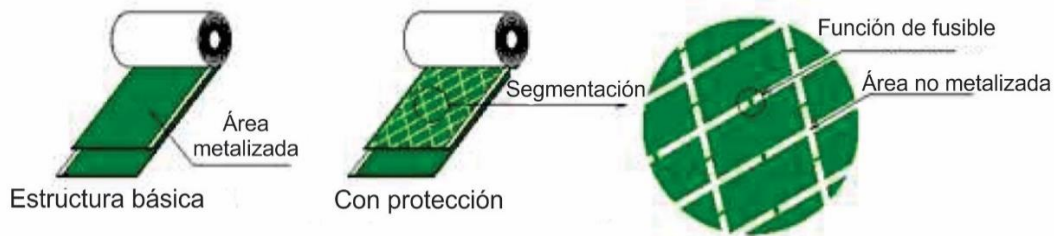


Figura 4.11 Estructura interna del capacitor metalizado [114].

Otro aspecto importante durante la fabricación del capacitor es el spray metalizado que sirve para realizar la conexión entre el interior y el exterior del capacitor. Si esta conexión no es adecuada el valor de la ESR incrementa y con ello se afectan aspectos como la cantidad de corriente que puede manejar, la disipación de calor y el tiempo de vida del capacitor. Por otra parte, en el caso de la inductancia serie equivalente (ESL *por sus siglas en inglés*) se desea el valor mínimo posible para evitar no afectar la conmutación de los interruptores [115].

En cuanto al tipo de enfriamiento para este tipo de capacitores, comúnmente se utilizan materiales de silicio o resina, ya que la técnica de aceite es difícil de implementar [116].

### **Retos de integración**

Desde el punto de vista del transformador de alta frecuencia principalmente se deben definir los requerimientos de tensión, corriente y frecuencia. Posteriormente existe una diversidad de parámetros libres que deben considerarse como lo son calibre del conductor o espesor en caso de ser placa, distancias en el diseño del transformador, geometría del transformador para conseguir el menor volumen posible, entre otros [94]. Diferentes estrategias tienen como objetivo optimizar aspectos de aislamiento y enfriamiento del transformador de alta frecuencia-con el uso de las nuevas tecnologías para núcleos y devanados [117-119]. El

principal reto se encuentra en distribuir de manera uniforme la corriente en los devanados, ya sea mediante el diseño del trenzado de hilo de litz o implementar algunas técnicas en las placas de cobre [120].

Por otro lado, para los capacitores del bus de CD se buscan estructuras simples para adaptar en el espacio del convertidor y que toleren las temperaturas de operación [108]. Es necesario que en la selección del capacitor se consideren aspectos como el envejecimiento del material dieléctrico, humedad y ambiente de trabajo del sistema ya que esto impacta en los valores de la resistencia serie equivalente, la cual debe ser del menor valor posible para no incrementar pérdidas al convertidor [121]. La integración de los capacitores con otros sistemas como interruptores o sistemas de enfriamiento es una alternativa para reducir volumen, peso e inductancias parásitas.

### **Conclusiones**

En esta sección se revisaron diferentes alternativas de diseño y fabricación para los elementos pasivos, transformador de alta frecuencia y capacitor para el bus de CD, que mejoran aspectos de eficiencia, volumen y peso en los convertidores electrónicos de media tensión.

En el caso del núcleo para el transformador de alta frecuencia los materiales amorfos son los más utilizados por sus buenas características de desempeño y costo, aunque los nanocristalinos puedan superarlos en desempeño sus principales restricciones como material para construir núcleos son sus limitadas estructuras disponibles comercialmente y elevado costo.

Los diseños de transformadores de alta frecuencia, que utilizan algunas de las diferentes alternativas presentadas, tienen alta eficiencia, son compactos y pueden integrarse con otros sistemas, pero aún deben solucionar retos como proporcionar el aislamiento a decenas de kilovoltios, distribución uniforme de la corriente en sus devanados y reducir el costo de fabricación.

## **CAPÍTULO 4**

Para fabricar el bus de CD, los arreglos en serie de capacitores de película metalizada son los más utilizados por la robustez que presentan en convertidores electrónicos de media tensión, sin embargo es necesario perfeccionar el material dieléctrico para conseguir diseños más eficientes y compactos. También es posible conseguir integración de los capacitores con otros elementos como el sistema de enfriamiento o interruptores. Los principales retos en el diseño de capacitores de película metalizada es reducir la resistencia serie equivalente, la inductancia serie equivalente y el costo.



# **CAPÍTULO 5**

## **SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO**



En los convertidores electrónicos de potencia, esencialmente existen dos elementos que requieren de un sistema de enfriamiento para mantener su temperatura dentro de sus límites de operación estable, estos elementos son el transformador de alta frecuencia y los interruptores [63]. En esta sección se describen algunas alternativas de los sistemas de enfriamiento utilizados en esos elementos.

### Alternativas para el transformador de alta frecuencia

En un transformador de alta frecuencia, todos sus elementos (núcleo, devanados y aislante) producen pérdidas que generan calor, y como resultado se incrementa la temperatura de operación del transformador, sin tomar en cuenta que a su vez otros elementos, durante la operación del convertidor también producen calor. Este panorama no es deseable debido a que disminuye la eficiencia del convertidor o en el peor de los casos se daña un elemento al sobrepasar sus niveles de temperatura permitidos [122].

El sistema de enfriamiento para núcleos y devanados debe agregar mayor confiabilidad al sistema, manteniendo los requerimientos de volumen y peso. La figura 5.1 presenta alternativas de enfriamiento para el núcleo, donde los disipadores extraen el calor por conducción y posteriormente se emplea enfriamiento por aire forzado o agua [123].

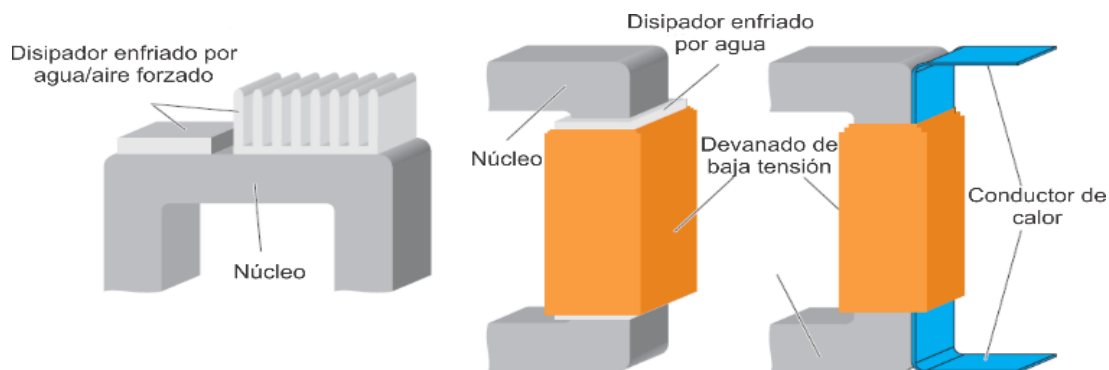


Figura 5.1 Alternativas de enfriamiento para el núcleo del transformador [123].

Implementar sistemas que estén en contacto directo con el núcleo mejora la cantidad de que se extrae de calor, sin embargo resulta complejo no afectar los parámetros de aislamiento, volumen y peso.

## CAPÍTULO 5

La figura 5.2 muestra algunas alternativas de enfriamiento para los devanados. Para hilo de litz el enfriamiento puede ser por aire forzado o mediante mangueras que transportan agua, en algunos casos se emplean los disipadores de los núcleos para enfriar los devanados de baja tensión. Para el cable de alta tensión se utiliza un material aislante y aire forzado.

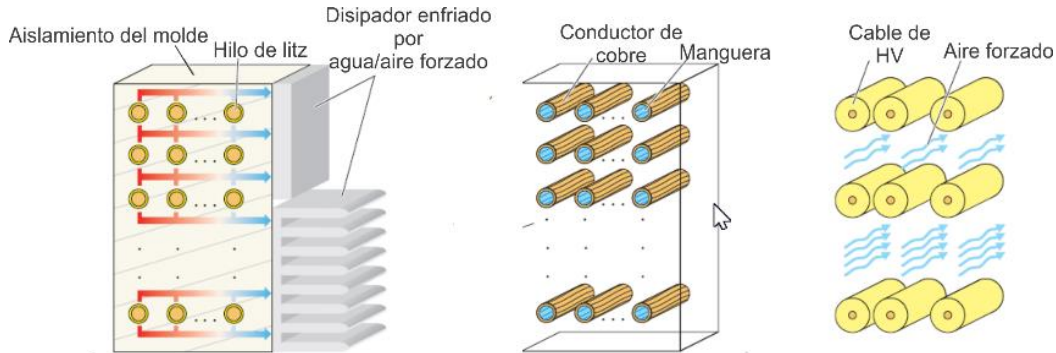


Figura 5.2 Alternativas de enfriamiento para los devanados del transformador [123].

En algunos casos el sistema de enfriamiento está conformado por el material aislante, en [124] el transformador se sumerge por completo en aceite y además en su estructura interna cuenta con un sistema de aire forzado.

Los sistemas de enfriamiento utilizados para el transformador de alta frecuencia son ampliamente conocidos ya que puede ser por disipadores, aire forzado, por agua y mediante el material aislante. El principal reto es agregar la menor cantidad de volumen y peso, además de mejorar la eficiencia del sistema.

### **Alternativas para dispositivos semiconductores**

El principal reto para el enfriamiento de los dispositivos semiconductores es reducir la resistencia térmica que se forma por el chip del interruptor, sus placas de soporte mecánico, la grasa de unión entre el interruptor y el sistema, y el disipador, ver figura 5.3, ya que de acuerdo al valor de esa resistencia será la cantidad de potencia disipada y pérdidas del interruptor [125].

La grasa térmica tiene el mayor porcentaje en agregar resistencia al sistema es por eso que varios diseñadores se enfocan en eliminarla y además mejorar la extracción de calor desde el chip.

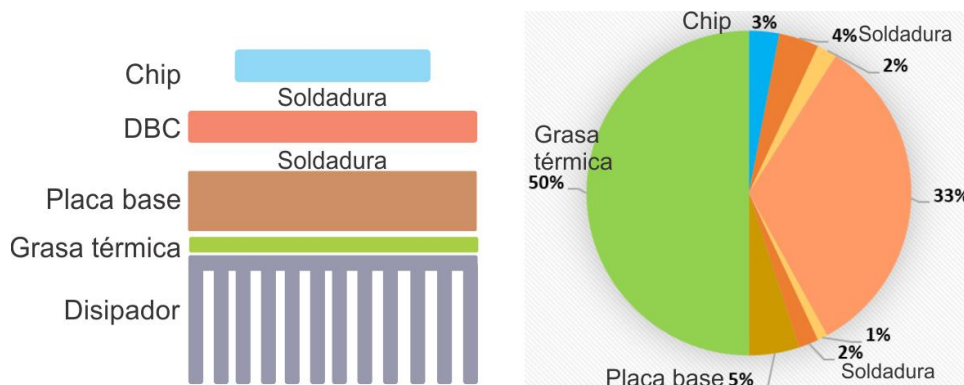


Figura 5.3 Porcentaje de resistencia térmica en un dispositivo semiconductor y disipador.

En esta sección se presentan algunas alternativas que buscan mejorar el diseño de los sistemas de enfriamiento en interruptores, entre ellas están los disipadores, placas de enfriamiento, enfriamiento directo y por evaporización del líquido [126-133].

Los disipadores de aluminio o cobre son los más conocidos para extraer el calor de los interruptores, además es posible combinarlos con enfriamiento por aire forzado. El problema en este tipo de diseños es la alta resistencia térmica que presentan, además de ser voluminosos y pesados. La figura 5.4(a) presenta el disipador típico, 5.4(b) es un disipador que emplea tubos de cobre que transportan agua y 5.4(c) es un disipador con diferentes áreas en cada aleta, esto sirve para mejorar la dispersión del aire entre los interruptores. Sin embargo estas alternativas aún requieren de la grasa térmica que es la principal causa de la alta resistencia térmica [126].

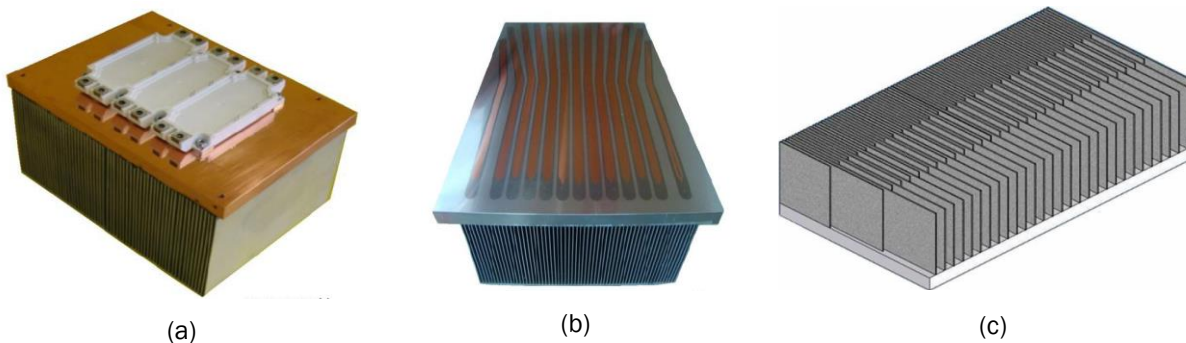


Figura 5.4 Disipadores. (a) Típico, (b) Por agua, (c) Variación del área de aletas [126].

## CAPÍTULO 5

La figura 5.5 presenta la alternativa en la que se elimina la placa base de soporte mecánico y el interruptor se une de forma directa al disipador, sin embargo es necesario colocar grasa térmica en la unión [131].

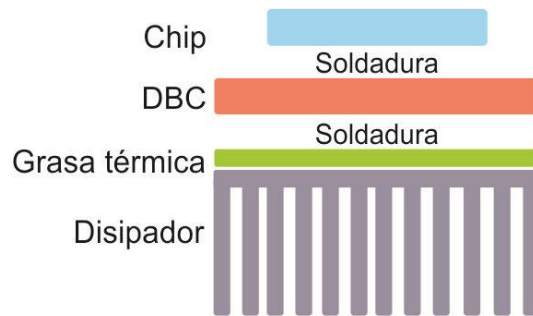


Figura 5.5 Enfriamiento con disipador sin la placa base.

La opción de eliminar la forma típica del disipador y realizar el enfriamiento mediante una placa que contiene tubos que transportan agua, ver figura 5.6, ofrece menor volumen y peso al dispositivo pero no se elimina la presencia de la grasa térmica [128, 129].

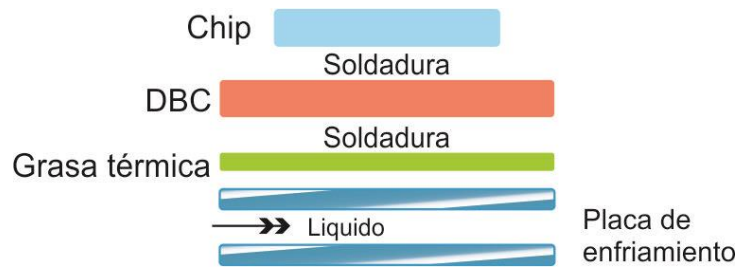


Figura 5.6 Enfriamiento mediante placas con tubos.

Con la finalidad de eliminar la grasa térmica y reducir la resistencia térmica total, el enfriamiento se realiza de manera directa en la placa de cobre que sirve como soporte mecánico al dispositivo. La figura 5.7 presenta el enfriamiento con placas, su principal desventaja es que no existe un intercambio de calor uniforme. Para mejorar la extracción del calor se lleva a cabo el enfriamiento por inyección, ver figura 5.8, pero requiere de elementos extras como mangueras. La figura 5.9 muestra un diseño similar a un disipador común en la placa base con la finalidad de mejorar el intercambio de calor y no requerir de una gran cantidad de elementos extras. La principal limitante para este tipo de diseños es conseguir el sellado entre la unión de la placa de cobre y el sistema de enfriamiento [127, 133].

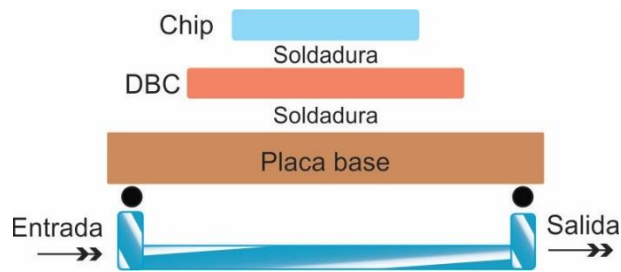


Figura 5.7 Enfriamiento directo en la placa base.

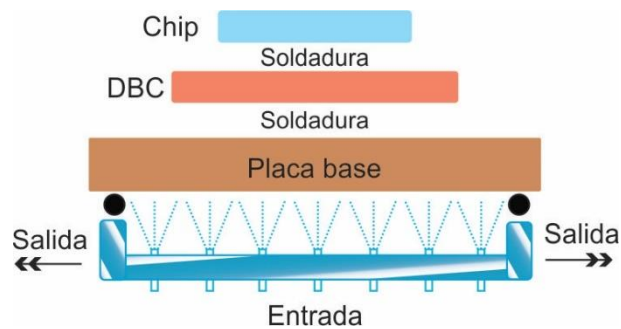


Figura 5.8 Enfriamiento directo en la placa base por inyección.

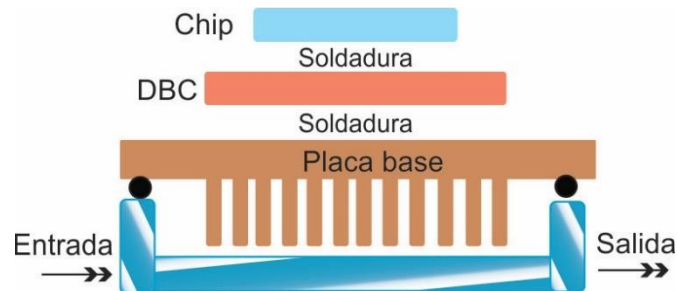


Figura 5.9 Enfriamiento directo en la placa base con diseño de disipador típico.

Para resolver el problema de sellado entre la placa de cobre y el sistema de enfriamiento, la placa de cobre se diseña de tal forma que pueda hacer la función completa del sistema de enfriamiento, con esto se reduce la resistencia térmica ya que se elimina la grasa térmica y se soluciona el problema de sellado entre ambos elementos. Para los diseños futuros se busca eliminar la soldadura entre el sustrato y la placa base [132]. La figura 5.10 muestra la estructura de la placa de cobre como sistema de enfriamiento.

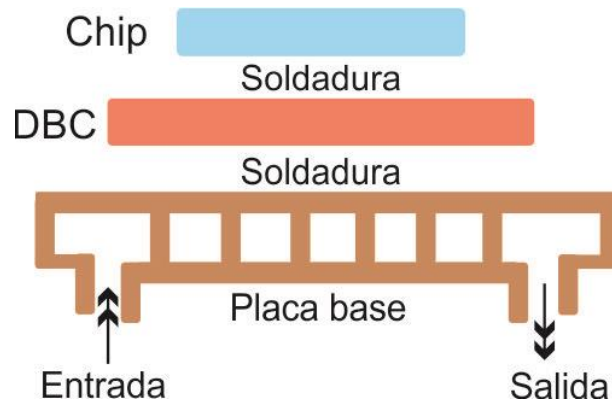


Figura 5.10 Placa base como sistema de enfriamiento.

La figura 5.11 muestra un sistema de enfriamiento diferente a los presentados. La estructura consta de una placa que contiene agua y está colocada en el interruptor, el agua se evapora por el calor del dispositivo y se traslada mediante tuberías hacia un condensador que es enfriado por aire, el vapor regresa a su estado líquido y a la placa. Su uso es recomendado en aplicaciones estáticas [126].

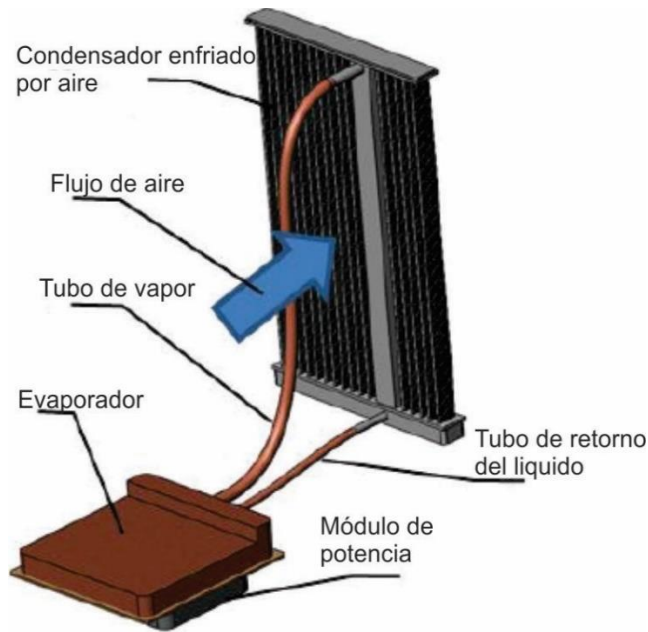


Figura 5.11 Enfriamiento por evaporización [126].



## **Conclusiones**

Actualmente el sistema de enfriamiento más utilizado en dispositivos semiconductores de media tensión es el de placas de enfriamiento por agua, sin embargo la meta por alcanzar es eliminar la mayor cantidad de resistencias térmicas al adherir el sistema de enfriamiento en la placa base del módulo. Ya existen prototipos de dispositivos con sistema de enfriamiento adjunto al módulo pero aún requieren de varias pruebas, sin embargo estos diseños benefician al dispositivo en aspectos de pérdidas, volumen y peso.

Otro reto para los sistemas de enfriamiento es flexibilidad para integrarse a otros sistemas sin modificar o alterar su estructura. Existen prototipos en los que sólo se emplea un sistema de enfriamiento para un banco de capacitores y el dispositivo semiconductor, esto reduce el volumen del convertidor y mejora la eficiencia.



**CAPÍTULO 6**

**CONCLUSIONES Y TRABAJOS**

**FUTUROS**



## Conclusiones

Los convertidores electrónicos de potencia de media tensión son elementos clave ante los retos que presentan las aplicaciones de sistemas de tracción, distribución de energía, entre otras. Ya que la búsqueda de nuevas topologías para este tipo de convertidores no ha presentado un amplio desarrollo, el sector industrial y algunos investigadores enfocan sus esfuerzos en mejorar aspectos de eficiencia, diseño, potencia, entre otros, mediante su adecuada implementación. Por esta razón resulta relevante conocer las características e implicaciones que conlleva el uso de los recientes diseños de dispositivos semiconductores, elementos pasivos y sistemas de enfriamiento, como una forma de mejorar las expectativas de aplicación de las topologías ya conocidas en los convertidores de media tensión.

En este trabajo se revisaron diferentes alternativas relacionadas con tecnologías de dispositivos semiconductores, circuitos impulsores de compuerta, elementos pasivos y sus respectivos sistemas de enfriamiento implementados en convertidores electrónicos de media tensión. El uso de nuevas tecnologías puede mejorar aspectos de diseño, eficiencia, potencia y simplicidad del convertidor acercándose en gran magnitud a los requerimientos deseados.

La revisión de las alternativas estuvo limitada de forma práctica ya que los rangos de potencia de los convertidores de media tensión son difíciles de conseguir en el sector académico, así mismo existieron algunas complicaciones para obtener la información debido a la privacidad que mantienen las industrias en sus desarrollos tecnológicos.

A pesar de que muchas alternativas mostradas aún requieren mejorar aspectos de fabricación y costo, no dejan de ser una idea atractiva para la fabricación de los convertidores electrónicos de media tensión, además de tener la flexibilidad de adaptarse a topologías sencillas y reducir su complejidad es aspectos de control y cantidad de elementos.

## CAPÍTULO 6

A continuación, se enlistan algunas de las alternativas revisadas en cada sección de este trabajo:

Dispositivos semiconductores, específicamente MOSFET e IGBT:

- El material SiC presenta mayor banda de energía y campo eléctrico que el Si, esto permite la fabricación de interruptores con mayor tensión de bloqueo.
- Los interruptores fabricados con SiC superan en tensión de bloqueo, potencia y frecuencia a los de Si, esto disminuye la cantidad de dispositivos que se requieren para los arreglos en serie o modular. Además, sus diseños son compactos, ligeros y se reducen sus resistencias parásitas.
- Sólo existen dispositivos MOSFET en SiC disponibles comercialmente de hasta 1.7kV con rangos de corriente cercanos a los 600A.
- Existen prototipos de laboratorio de MOSFET en SiC para bloquear tensiones de hasta 15kV, esto reducirá la complejidad de fabricación de los convertidores electrónicos de media tensión.
- Los dispositivos de SiC tienen menor exigencia en sus sistemas de enfriamiento debido a la buena conductividad térmica del material.
- Las frecuencias de operación oscilan entre 3 y 50 kHz según los requerimientos de la aplicación, es necesario considerar las altas probabilidades de EMI por la cantidad de corriente que portan los interruptores.
- La fabricación del IGBT en SiC está limitada por un problema conocido como BPD (Base Plate Dislocation) que se presenta desde la apilación de las capas del interruptor, esto ocasiona que la caída de tensión durante la conducción sea mayor que la de un IGBT en Si.
- Existen prototipos de laboratorios de IGBT en SiC que pueden bloquear tensiones superiores a los 15kV. Comercialmente sólo existen IGBT híbridos, es decir su diodo interno es de SiC y esto le permite tener menores pérdidas durante el transitorio de apagado comparado con el IGBT completamente en Si.
- Los diseñadores de empaques para MOSFET e IGBT en SiC están probando conexiones planares e integración de sistemas de enfriamiento con la finalidad de reducir volumen, peso y pérdidas.

- Es necesario reducir el costo del material y de producción de los interruptores en SiC, así como mejorar y corregir los problemas de diseño y fabricación para alcanzar una adecuada relación costo-eficiencia.

En el caso de los circuitos impulsores de compuerta:

- Para aislar la señal de control es posible utilizar aislamiento óptico o galvánico. Para la primera alternativa existen circuitos integrados comercialmente disponibles que pueden aislar hasta 50kV o también se encuentra la fibra óptica, en el caso de la segunda opción es posible utilizar transformadores o placas capacitivas.
- La principal ventaja que se consigue con la fibra óptica es que no existe distorsión de la señal de control, además reduce las pérdidas, el volumen y peso del sistema. Su desventaja es el costo.
- De las alternativas de aislamiento galvánico, desde el punto de vista de pérdidas, costo, volumen y peso resultan más eficiente las placas capacitivas.
- Las principales topologías utilizadas para las fuentes de alimentación de los circuitos impulsores son medio puente y puente completo. El aislamiento comúnmente se realiza mediante transformadores o en algunos casos inductores planares, estos últimos mejoran características de volumen y peso.
- Los convertidores electrónicos de media tensión utilizan arreglos de dispositivos en serie o modular para conseguir los niveles de tensión; sin embargo, requieren de circuitos de sincronización para evitar que en algún momento un solo interruptor soporte toda la tensión.
- Las redes de amortiguamiento pasivas son circuitos de sincronización conformados por resistencias, series y capacitores. Son útiles para aplicaciones robustas y disminuyen pérdidas de conmutación, pero limitan la velocidad de conmutación y pueden agregar ligeras pérdidas de conducción.
- Otra alternativa son los circuitos activos de enclavamiento, su configuración se realiza con diodos Zener, resistencias y capacitores. Son útiles para protección de sobretensiones, pero no aseguran la sincronización.
- Por último, se encuentran los circuitos de control activo de la compuerta, sus diseños se conforman por circuitería analógica, dispositivos FPGA, DSP, entre otros. Con estos

## CAPÍTULO 6

circuitos no se limita la velocidad de conmutación, no requieren de elementos pasivos pero son complejos de fabricar y diseñar.

- En algunos casos se utilizan circuitos híbridos, es decir se implementan dos técnicas de los circuitos de sincronización, y esto le da al sistema mayor seguridad.

Elementos pasivos, transformador de alta frecuencia y capacitor para el bus CD:

- El material amorfo es el más utilizado en la fabricación de núcleos para transformadores de alta frecuencia-potencia ya que son de menor tamaño y costo comparado con los de ferrita.
- El material nanocristalino presenta mejores características de desempeño que los dos anteriores; sin embargo, está limitado comercialmente a estructuras toroidales y su costo es muy elevado.
- De las estructuras disponibles para el diseño de núcleos existen matriciales que son para alta potencia, tipo Shell que ofrece diseños compactos, con buena conductividad térmica y bajas pérdidas, y tipo Core útil para altas potencias, ofrece diseños compactos y eficientes.
- Los devanados disponibles para transformadores de alta frecuencia-potencia son hilo de litz y placas de cobre. Estas últimas son más económicas y tienen mejor aprovechamiento de la ventana. El problema en común es la distribución uniforme de corriente.
- El material dieléctrico también funciona como sistema de enfriamiento, el más común en convertidores de media tensión es el aceite.
- Los capacitores de película de polipropileno metalizada son los más utilizados en el diseño de bus de CD ya que reducen las pérdidas por su baja ESR.
- Los diseñadores buscan integrar los capacitores de película metalizada al sistema de enfriamiento del interruptor, con esto se consigue reducir resistencias parásitas, volumen y peso.



En el caso de sistemas de enfriamiento:

- En los convertidores electrónicos de media tensión, el transformador de alta frecuencia y los interruptores son los elementos que más requieren de un sistema de enfriamiento.
- El transformador de alta frecuencia requiere de un sistema de enfriamiento para sus núcleos y devanados, comúnmente se utiliza aire forzado o por agua, y estos se combinan con el uso de disipadores.
- En algunos casos los devanados de hilo de litz utilizan enfriamiento por agua, esto se consigue al realizar el entrelazado sobre la superficie de una manguera que transporta el líquido.
- Es común que el material dieléctrico del transformador también realice la función de sistema de enfriamiento.
- En el caso de dispositivos semiconductores, específicamente MOSFET e IGBT, los diseñadores buscan integrar el sistema de enfriamiento al empaque.
- La alternativa más común es el disipador, pero este agrega volumen, peso y presenta alta resistencia térmica, lo cual aumenta las pérdidas.
- En algunos casos se elimina la placa base de soporte mecánico de los interruptores y el enfriamiento se realiza de forma directa; sin embargo, esta alternativa aun requiere del uso de grasa térmica, que es el principal elemento en agregar resistencia y por lo tanto no se reducen las pérdidas. Además, el uso de disipadores conlleva a sistemas pesados y voluminosos.
- Con la finalidad de eliminar volumen y peso, algunos diseñadores utilizan enfriamiento con placas de agua, sin embargo, aún se requiere de grasa térmica.
- Una alternativa no muy viable es colocar nuevamente la placa base de soporte mecánico, eliminar la grasa térmica y enfriar el interruptor con agua, de forma directa a la base; sin embargo, existe el inconveniente de conseguir un buen sellado entre el sistema de enfriamiento y el dispositivo.
- Por último, los diseñadores están probando la técnica de moldear la placa base del interruptor, con la finalidad de que haga la función de sistema de enfriamiento y pueda transportar el líquido. Esta técnica reduciría la resistencia térmica total, el volumen, peso y mejorará el desempeño del dispositivo.

## CAPÍTULO 6

### Trabajos a futuro

Este trabajo aborda diferentes alternativas en el diseño y fabricación de convertidores electrónicos de media tensión, a partir de mejoras en la selección de dispositivos semiconductores, circuitos impulsores de compuerta, elementos pasivos y sistemas de enfriamiento. Estas alternativas presentan una gran mejora en aspectos de eficiencia, diseño, potencia, integración y simplicidad del convertidor; sin embargo, al ser tecnologías relativamente nuevas aún queda un gran campo de estudio, en ese sentido se visualizan los posibles trabajos futuros:

- Estudiar a fondo las limitaciones de fabricación para dispositivos semiconductores de carburo de silicio con tensión de bloqueo superior a la actual disponible comercialmente.
- Estudiar circuitos impulsores que ayuden a mitigar la presencia de interferencia electromagnética (*EMI por sus siglas en inglés*).
- Estudiar alternativas para el diseño de empaques en dispositivos semiconductores de carburo de silicio.
- Estudiar estrategias de diseño y fabricación para los transformadores de alta frecuencia-potencia.
- Profundizar en el tema de sistemas de enfriamiento de forma separada para cada elemento del convertidor electrónico de potencia.
- Implementar cada una de las alternativas y corroborarlas con resultados prácticos.

# REFERENCIAS

## INTRODUCCIÓN

- [1] J. G. Trasancos, *Instalaciones eléctricas en media y baja tensión 7.ª edición 2016*: Ediciones Paraninfo, SA, 2016.
- [2] E. I. Carroll, "Power electronics for very high power applications," in *1998 Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives (IEE Conf. Publ. No. 456)*, 1998, pp. 218-223.
- [3] C. Meyer and R. W. D. Doncker, "Power electronics for modern medium-voltage distribution systems," in *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004.*, 2004, pp. 58-66 Vol.1.
- [4] J. D. van Wyk and F. C. Lee, "On a future for power electronics," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, pp. 59-72, 2013.
- [5] R. Uchida and T. Yamada, "Power electronics for high-power applications in the 21st Century," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, 2000, pp. P20-P27 vol.1.
- [6] R. W. D. Doncker, "Medium-voltage power electronic technologies for future decentralized power systems," in *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579)*, 2002, pp. 927-932 vol.3.
- [7] S. Bernet, "Recent developments of high power converters for industry and traction applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, pp. 1102-1117, 2000.
- [8] G. Ortiz, "High-power DC-DC converter technologies for smart grid and traction applications," 2014.
- [9] S. Falcones, X. Mao, and R. Ayyanar, "Topology comparison for solid state transformer implementation," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1-8.
- [10] S. Farnesi, M. Marchesoni, and L. Vaccaro, "Advances in locomotive Power Electronic systems directly fed through AC lines," in *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2016, pp. 657-664.
- [11] L. Heinemann, "An actively cooled high power, high frequency transformer with high insulation capability," in *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335)*, 2002, pp. 352-357 vol.1.
- [12] J. Taufiq, "Power electronics technologies for railway vehicles," in *Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC'07*, 2007, pp. 1388-1393.
- [13] B. Engel, M. Victor, G. Bachmann, and A. Falk, "15 kV/16.7 Hz energy supply system with medium frequency transformer and 6.5 kV IGBTs in resonant operation," in *Proc. EPE*, 2003, pp. 2-4.
- [14] M. Glinka and R. Marquardt, "A new AC/AC multilevel converter family," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, pp. 662-669, 2005.
- [15] M. Glinka and R. Marquardt, "A new AC/AC-multilevel converter family applied to a single-phase converter," in *Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on*, 2003, pp. 16-23.

- [16] M. Youssef, J. A. A. Qahouq, and M. Orabi, "Analysis and design of LCC resonant inverter for the transportation systems applications," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, 2010, pp. 1778-1784.
- [17] M. Youssef, J. A. A. Qahouq, and M. Orabi, "Electromagnetic compatibility results for an LCC resonant inverter for the transportation systems," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, 2010, pp. 1800-1803.
- [18] C. Zhao, D. Dujic, A. Mester, J. K. Steinke, M. Weiss, S. Lewdeni-Schmid, et al., "Power Electronic Traction Transformer Medium Voltage Prototype," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 3257-3268, 2014.
- [19] D. Dujic, C. Zhao, A. Mester, J. K. Steinke, M. Weiss, S. Lewdeni-Schmid, et al., "Power electronic traction transformer-low voltage prototype," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 5522-5534, 2013.
- [20] D. Dujic, A. Mester, T. Chaudhuri, A. Coccia, F. Canales, and J. K. Steinke, "Laboratory scale prototype of a power electronic transformer for traction applications," in *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, 2011, pp. 1-10.
- [21] X. She, R. Burgos, G. Wang, F. Wang, and A. Q. Huang, "Review of solid state transformer in the distribution system: From components to field application," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, 2012, pp. 4077-4084.
- [22] S. Bifaretti, P. Zanchetta, A. Watson, L. Tarisciotti, and J. C. Clare, "Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 231-243, 2011.
- [23] J.-S. Lai, A. Maitra, A. Mansoor, and F. Goodman, "Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications," in *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*, 2005, pp. 1893-1899.
- [24] B. Backlund, M. Rahimo, S. Klaka, and J. Siefken, "Topologies, voltage ratings and state of the art high power semiconductor devices for medium voltage wind energy conversion," in *Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2009. PEMWA 2009. IEEE*, 2009, pp. 1-6.
- [25] J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler, and J. W. Kolar, "SiC versus Si—Evaluation of potentials for performance improvement of inverter and DC–DC converter systems by SiC power semiconductors," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 58, pp. 2872-2882, 2011.
- [26] P. Crowe, "Silicon Carbide Tested By Toyota To Save Energy In Its Future Hybrids."
- [27] P. Friedrichs, "Silicon carbide power devices-status and upcoming challenges," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1-11.

### **DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES**

- [28] X. She, A. Q. Huang, O. Lucia, and B. Ozpineci, "Review of silicon carbide power devices and their applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017.
- [29] J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. Pérez-Tomás, and J. Rebollo, "A survey of wide bandgap power semiconductor devices," *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 2155-2163, 2014.

- [30] Z. Wang, A. Castellazzi, S. Saeed, Á. Navarro-Rodríguez, and P. Garcia, "Impact of SiC technology in a three-port active bridge converter for energy storage integrated solid state transformer applications," in *Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2016 IEEE 4th Workshop on*, 2016, pp. 84-89.
- [31] N. Evans, T. Lagier, and A. Pereira, "A preliminary loss comparison of solid-state transformers in a rail application Employing Silicon Carbide (SiC) MOSFET switches," 2016.
- [32] J. Rabkowski, D. Peftitsis, and H.-P. Nee, "Silicon carbide power transistors: A new era in power electronics is initiated," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, pp. 17-26, 2012.
- [33] A. Q. Huang, Q. Zhu, L. Wang, and L. Zhang, "15 kV SiC MOSFET: An enabling technology for medium voltage solid state transformers," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 2, pp. 118-130, 2017.
- [34] A. Elasser and T. P. Chow, "Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 969-986, 2002.
- [35] M. Electric, "SiC Power Modules " 2016.
- [36] J. Rabkowski, "Power converters with Silicon Carbide devices," in *2014 14th Biennial Baltic Electronic Conference (BEC)*, 2014, pp. 7-16.
- [37] G. L. Harris, *Properties of silicon carbide*: let, 1995.
- [38] V. Izhevskiy, L. Genova, J. Bressiani, and A. Bressiani, "silicon carbide. Structure, properties and processing," *Cerâmica*, vol. 46, pp. 4-13, 2000.
- [39] M. A. C. Codreanu, E. Carunescu, E. Iliescu, "Comparison of 3C-SiC, 6H-SiC and 4H-SiC MESFETs performances," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 3, pp. 137-142, 2000.
- [40] Y. C. Liang, G. S. Samudra, and C.-F. Huang, *Power microelectronics: device and process technologies*: World Scientific, 2017.
- [41] T. Ayalew, "SiC Semiconductor Devices: Technology, Modeling, and Simulation," *Semiconductor Research Corporation* 2010.
- [42] B. J. Baliga, *Fundamentals of power semiconductor devices*: Springer Science & Business Media, 2010.
- [43] K. Vechalapu, S. Bhattacharya, E. V. Brunt, S. H. Ryu, D. Grider, and J. W. Palmour, "Comparative Evaluation of 15-kV SiC MOSFET and 15-kV SiC IGBT for Medium-Voltage Converter Under the Same dv/dt Conditions," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, pp. 469-489, 2017.
- [44] S. Madhusoodhanan, A. Tripathi, D. Patel, K. Mainali, A. Kadavelugu, S. Hazra, et al., "Solid-State Transformer and MV Grid Tie Applications Enabled by 15 kV SiC IGBTs and 10 kV SiC MOSFETs Based Multilevel Converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 3343-3360, 2015.
- [45] F. Wang, G. Wang, A. Huang, W. Yu, and X. Ni, "Design and operation of A 3.6kV high performance solid state transformer based on 13kV SiC MOSFET and JBS diode," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 4553-4560.
- [46] F. Wang, Gangyao, A. Huang, Wensong, and X. Ni, "A 3.6kV high performance solid state transformer based on 13kV SiC MOSFET," in *2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2014, pp. 1-8.

- [47] D. Rothmund, G. Ortiz, T. Guillod, and J. W. Kolar, "10kV SiC-based isolated DC-DC converter for medium voltage-connected Solid-State Transformers," in *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 1096-1103.
- [48] H. Mirzaee, A. De, A. Tripathi, and S. Bhattacharya, "Design Comparison of High-Power Medium-Voltage Converters Based on a 6.5-kV Si-IGBT/Si-PiN Diode, a 6.5-kV Si-IGBT/SiC-JBS Diode, and a 10-kV SiC-MOSFET/SiC-JBS Diode," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 2728-2740, 2014.
- [49] J. Rąbkowski and T. Płatek, "Comparison of the power losses in 1700V Si IGBT and SiC MOSFET modules including reverse conduction," in *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 2015, pp. 1-10.
- [50] J. Kolar and J. Huber, "Solid-state transformers—Key design challenges, applicability, and future concepts," in *8th Int. Power Electron. and Motion Control Conf., Hefei, China*, 2016.
- [51] S. Madhusoodhanan, K. Hatua, S. Bhattacharya, S. Leslie, S. H. Ryu, M. Das, et al., "Comparison study of 12kV n-type SiC IGBT with 10kV SiC MOSFET and 6.5kV Si IGBT based on 3L-NPC VSC applications," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 310-317.
- [52] A. Agarwal, H. Fatima, S. Haney, and S. H. Ryu, "A New Degradation Mechanism in High-Voltage SiC Power MOSFETs," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 28, pp. 587-589, 2007.
- [53] F. J. Kub, "Silicon carbide power device status and issue," in *2012 IEEE Energytech*, 2012, pp. 1-5.
- [54] R. Singh, "Reliability and performance limitations in SiC power devices," *Microelectronics Reliability*, vol. 46, pp. 713-730, 2006/05/01/ 2006.
- [55] G. Wang, S. Baek, J. Elliott, A. Kadavelugu, F. Wang, X. She, et al., "Design and hardware implementation of Gen-1 silicon based solid state transformer," in *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2011, pp. 1344-1349.
- [56] X. Wang, S. Ouyang, J. Liu, F. Meng, and R. Javed, "Comparison of different IGBT based designs of power electronic transformer," in *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, 2014, pp. 624-628.
- [57] S. Madhusoodhanan, K. Mainali, A. K. Tripathi, A. Kadavelugu, D. Patel, and S. Bhattacharya, "Power Loss Analysis of Medium-Voltage Three-Phase Converters Using 15-kV; 40-A SiC N-IGBT," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, pp. 902-917, 2016.
- [58] A. Higuchi, Q. Yu, T. Oshidari, and M. Cui, "A study on evaluation method of new packaging structure for high-temperature power device," in *Electronic Materials and Packaging (EMAP), 2012 14th International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [59] M.-L. Locatelli, R. Khazaka, S. Diahm, C.-D. Pham, M. Bechara, S. Dinculescu, et al., "Evaluation of encapsulation materials for High-Temperature power device packaging," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 2281-2288, 2014.
- [60] C. M. DiMarino, R. Burgos, and B. Dushan, "High-temperature silicon carbide: characterization of state-of-the-art silicon carbide power transistors," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, pp. 19-30, 2015.

- [61] Z. Liang, "Planar-bond-all: A technology for three-dimensional integration of multiple packaging functions into advanced power modules," in *Integrated Power Packaging (IWIPP), 2015 IEEE International Workshop on*, 2015, pp. 115-118.

### CIRCUITOS IMPULSORES

- [62] Y. Chu and S. Wang, "A generalized common-mode current cancelation approach for power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 4130-4140, 2015.
- [63] X. She, A. Q. Huang, and R. Burgos, "Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, pp. 186-198, 2013.
- [64] A. Kishore, C. Patki, M. Anwar, W. Ivan, and M. Teimor, "Investigation of common mode noise in electric propulsion system high voltage components in an electrified vehicle," in *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2016, pp. 1-6.
- [65] J. T. Strydom, M. A. d. Rooij, and J. D. v. Wyk, "A comparison of fundamental gate-driver topologies for high frequency applications," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE*, 2004, pp. 1045-1052 vol.2.
- [66] F. E. Cazakevicius, J. O. Quevedo, R. C. Beltrame, and J. R. Pinheiro, "High insulation voltage gate-driver applied to a solid state transformer," in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015, pp. 1-6.
- [67] X. Zhang, H. Li, J. A. Brothers, L. Fu, M. Perales, J. Wu, et al., "A Gate Drive With Power Over Fiber-Based Isolated Power Supply and Comprehensive Protection Functions for 15-kV SiC MOSFET," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, pp. 946-955, 2016.
- [68] M. Ranjbar, M. Farzi, A. A. Ahmad, and A. Abrishamifar, "Theoretical and practical considerations relating to design high-voltage IGBT valve," in *2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2011, pp. 1-1.
- [69] S. Zeltner, "Insulating IGBT driver with PCB integrated capacitive coupling elements," in *2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, 2010, pp. 1-6.
- [70] D. W. Berning, T. H. Duong, J. M. Ortiz-Rodriguez, A. Rivera-Lopez, and J. A. R. Hefner, "High-Voltage Isolated Gate Drive Circuit for 10 kV, 100 A SiC MOSFET/JBS Power Modules," in *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1-7.
- [71] S. Ma, T. Zhao, and B. Chen, "4A isolated half-bridge gate driver with 4.5V to 18V output drive voltage," in *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, 2014, pp. 1490-1493.
- [72] F. Bauer, L. Meysenc, and A. Piazzesi, "Suitability and optimization of high-voltage IGBTs for series connection with active voltage clamping," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 20, pp. 1244-1253, 2005.
- [73] A. Piazzesi and L. Meysenc, "Series connection of 3.3 kV IGBTs with active voltage balancing," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 893-898.

- [74] P. R. Palmer, H. S. Rajamani, and N. Dutton, "Experimental comparison of methods of employing IGBTs connected in series," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 151, pp. 576-582, 2004.
- [75] R. Chokhawala, B. Danielsson, and L. Angquist, "Power semiconductors in transmission and distribution applications," in *Power Semiconductor Devices and ICs, 2001. ISPSD'01. Proceedings of the 13th International Symposium on*, 2001, pp. 3-10.
- [76] H. Rüedi, P. Köhli, and C.-C. T. AG, "Driver solutions for high-voltage IGBTs," *PCIM Europe April*, 2002.
- [77] K. Kusaka, M. Kato, K. Orikawa, J. i. Itoh, I. Hasegawa, K. Morita, et al., "Galvanic isolation system for multiple gate drivers with inductive power transfer; Drive of three-phase inverter," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 4525-4532.
- [78] C. Marxgut, J. Biela, J. W. Kolar, R. Steiner, and P. K. Steimer, "DC-DC converter for gate power supplies with an optimal air transformer," in *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010, pp. 1865-1870.
- [79] L. Yang, P. Fu, X. Yao, and J. Wang, "A module based self-balanced series connection for IGBT," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, 2014, pp. 1953-1958.
- [80] T. Van Nguyen, P.-O. Jeannin, E. Vagnon, D. Frey, and J.-C. Crebier, "Series connection of IGBT," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, 2010, pp. 2238-2244.
- [81] I. Baraia, I. Atutxa, S. Alvarez, and M. Mazuela, "Analysis and experimental evaluation of two low loss auxiliary circuits for the series connection of IGBT devices," in *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, 2013, pp. 1-10.
- [82] P. Palmer, W. He, X. Zhang, J. Zhang, and M. Snook, "IGBT series connection under Active Voltage Control with temporary clamp," in *IECon 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 465-470.
- [83] C. Jiann-Fuh, L. Jiunn-Nan, and A. Tsu-Hua, "The techniques of the serial and paralleled IGBTs," in *Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, 1996, pp. 999-1004 vol.2.
- [84] C. Zhang, Y. Wei, Q. Jiang, and L. Tong, "Dynamic voltage balancing of series connected IGBTs using slope regulating and voltage clamping," in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 4336-4340.
- [85] N. Y. A. Shamas, R. Withanage, and D. Chamund, "Review of series and parallel connection of IGBTs," *IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems*, vol. 153, pp. 34-39, 2006.
- [86] H. Yaqiang, C. Wenjie, C. Xiliang, M. Xin, S. Yilin, Y. Xu, et al., "A 4000V input auxiliary power supply with series connected SiC MOSFETs for MMC-based HVDC system," in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016, pp. 279-284.
- [87] R. Withanage and N. Shamas, "Series Connection of Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 2204-2212, 2012.



- [88] Y. Ren, X. Yang, F. Zhang, K. Wang, W. Chen, L. Wang, *et al.*, "A Compact Gate Control and Voltage Balancing Circuit for Series-connected SiC MOSFETs and Its Application in DC-Breaker," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, pp. 1-1, 2017.
- [89] C. Abbate, G. Busatto, and F. Iannuzzo, "High-Voltage, High-Performance Switch Using Series-Connected IGBTs," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, pp. 2450-2459, 2010.
- [90] B. Ju Won, Y. Dong-Wook, and K. Heung-Geun, "High-voltage switch using series-connected IGBTs with simple auxiliary circuit," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, pp. 1832-1839, 2001.
- [91] T. C. Lim, B. W. Williams, S. J. Finney, and P. R. Palmer, "Series-Connected IGBTs Using Active Voltage Control Technique," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 4083-4103, 2013.
- [92] F. Zhang, X. Yang, Y. Ren, L. Feng, W. Chen, and Y. Pei, "A Hybrid Active Gate Drive for Switching Loss Reduction and Voltage Balancing of Series-Connected IGBTs," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, pp. 7469-7481, 2017.
- [93] G. Regnat, P.-O. Jeannin, J. Ewanchuk, D. Frey, S. Mollov, and J.-P. Ferrieux, "Optimized power modules for silicon carbide MOSFET," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016 IEEE*, 2016, pp. 1-8.

#### ELEMENTOS PASIVOS

- [94] M. Bahmani, "Design and Optimization of HF Transformers for High Power DC-DC Applications," pp. 53-58, 2014.
- [95] Z. Juanjuan, D. Yumei, L. Zixin, and W. Ping, "Design of a medium frequency, high voltage transformer for power electronic transformer," in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014, pp. 1-5.
- [96] S. Vaisambhayana, C. Dincan, C. Shuyu, A. Tripathi, T. Haonan, and B. R. Karthikeya, "State of art survey for design of medium frequency high power transformer," in *2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, 2016, pp. 1-9.
- [97] V. C. V. Alex Van den Bossche, "Inductors and Transformers for Power Electronics," 2005.
- [98] M. S. Rylko, K. J. Hartnett, J. G. Hayes, and M. G. Egan, "Magnetic material selection for high power high frequency inductors in dc-dc converters," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*, 2009, pp. 2043-2049.
- [99] E. A. M. A. Bahmani<sup>1</sup>, T. Thiringer<sup>1</sup>, H. K. Høidalen<sup>2</sup>, and Y. Serdyuk, "Core loss behavior in high frequency high power transformers—I: Effect of core topology," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, 2012.
- [100] E. Agheb and H. K. Høidalen, "Medium frequency high power transformers, state of art and challenges," in *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [101] I. Villar, "Multiphysical characterization of medium-frequency power electronic transformers," *Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 2010.
- [102] C. R. Sullivan, "Prospects for advances in power magnetics," in *CIPS 2016; 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, 2016, pp. 1-9.

- [103] K. V. Iyer, W. P. Robbins, and N. Mohan, "Winding design of a high power medium frequency transformer," in *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2014, pp. 665-669.
- [104] C. R. Sullivan, "Layered foil as an alternative to litz wire: Multiple methods for equal current sharing among layers," in *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2014, pp. 1-7.
- [105] M. Steiner and H. Reinold, "Medium frequency topology in railway applications," in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, pp. 1-10.
- [106] G. Ortiz, M. Leibl, J. W. Kolar, and O. Apeldoorn, "Medium frequency transformers for solid-state-transformer applications; Design and experimental verification," in *2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2013, pp. 1285-1290.
- [107] G. Ortiz, J. Biela, D. Bortis, and J. W. Kolar, "1 Megawatt, 20 kHz, isolated, bidirectional 12kV to 1.2kV DC-DC converter for renewable energy applications," in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, 2010, pp. 3212-3219.
- [108] P. Bettacchi, D. Montanari, D. Zanarini, D. Orioli, G. Rondelli, and A. Sanua, "Power film capacitors for industrial applications," *2010 CARTS Proceeding, November 2010, Munich, Germany*, 2010.
- [109] M. Salcone and J. Bond, "Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications," in *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009, pp. 1692-1699.
- [110] H. Wang and F. Blaabjerg, "Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—An overview," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 3569-3578, 2014.
- [111] J. Ho, T. R. Jow, and S. Boggs, "Historical introduction to capacitor technology," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 26, pp. 20-25, 2010.
- [112] W. J. Sarjeant, J. Zirnheld, and F. W. MacDougall, "Capacitors," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 26, pp. 1368-1392, 1998.
- [113] R. Anderson, "Select the right plastic film capacitor for your power electronic applications," in *Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE*, 1996, pp. 1327-1330 vol.3.
- [114] Rubycon, "Technical trend of power film capacitors for industrial use," 2011.
- [115] J. Gallipeau, "Power Film Capacitors Prove Effective in Renewable Energy and Smart Grid Technology," *Power Film Capacitors, AVX*, 2017.
- [116] A. R. Shete and A. R. Thorat, "An optimal technique for manufacturing of high voltage capacitor by using Metallized Polypropylene Film," in *2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 2014, pp. 130-135.
- [117] M. A. Bahmani, "Design considerations of medium-frequency power transformers in HVDC applications," in *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2017, pp. 1-6.
- [118] C. R. Sullivan, "Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, pp. 283-291, 1999.
- [119] W. G. Hurley, E. Gath, and J. G. Breslin, "Optimizing the ac resistance of multilayer transformer windings with arbitrary current waveforms," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 15, pp. 369-376, 2000.

- [120] T. Guillod, J. Huber, F. Krismer, and J. W. Kolar, "Litz wire losses: Effects of twisting imperfections," in *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2017 IEEE 18th Workshop on*, 2017, pp. 1-8.
- [121] D. Burger, "Metallized Film Capacitors," *Bodos Power systems*, pp. 68-70, 2013.

### SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

- [122] J. Feng, W. Chu, Z. Zhang, and Z. Zhu, "Power Electronic Transformer-Based Railway Traction Systems: Challenges and Opportunities," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, pp. 1237-1253, 2017.
- [123] G. Ortiz, J. Biela, and J. W. Kolar, "Optimized design of medium frequency transformers with high isolation requirements," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 631-638.
- [124] C. Zhao, S. Lewdeni-Schmid, J. K. Steinke, M. Weiss, T. Chaudhuri, M. Pellerin, *et al.*, "Design, implementation and performance of a modular power electronic transformer (PET) for railway application," in *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011, pp. 1-10.
- [125] D.-I. A. Wintrich, D.-I. U. Nicolai, D. t. W. Tursky, and P. D.-I. T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors," *SEMIKRON International*, 2015.
- [126] S. S. Kang, "Advanced cooling for power electronics," in *Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2012 7th International Conference on*, 2012, pp. 1-8.
- [127] Z. Liang, P. Ning, and F. Wang, "Development of advanced all-SiC power modules," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 2289-2295, 2014.
- [128] C.-K. Liu, Y.-L. Chao, S.-J. Yang, R.-C. Fang, W.-K. Han, J. Tu, *et al.*, "Direct liquid cooling For IGBT power module," in *Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2014 9th International*, 2014, pp. 41-44.
- [129] J. Harder, K. Exel, and A. Meyer, "Direct liquid cooling of power electronics devices," in *Proc. 4th Int. Conf. Integrated Power Systems*, 2006, pp. 347-351.
- [130] K. Vladimirova, J.-C. Crebier, Y. Avenas, and C. Schaeffer, "Drift region integrated microchannels for direct cooling of power electronic devices: Advantages and limitations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 2576-2586, 2013.
- [131] J. Schulz-Harder, "Review on highly integrated solutions for power electronic devices," in *Integrated Power Systems (CIPS), 2008 5th International Conference on*, 2008, pp. 1-7.
- [132] Z. Liang, "Integrated Double Sided Cooling Packaging of Planar SiC Power Modules-Final paper," Oak Ridge National Laboratory (ORNL); Power Electronics and Electric Machinery Research Facility 2015.
- [133] B. Hu, Z. Zeng, W. Shao, Q. Ma, H. Ren, H. Li, *et al.*, "Novel cooling technology to reduce thermal impedance and thermomechanical stress for SiC application," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2017 IEEE*, 2017, pp. 3063-3067.