



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

"ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE"

**COMPARATIVA DE TOPOLOGÍAS DEL CONVERTIDOR BUCK EN MODO DE
CONDUCCIÓN CONTINUO**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA Y ELECTRÓNICO

PRESENTA

VARGAS OLÁN JESÚS RODRIGO

BAJO LA DIRECCIÓN DE

M.C. MARTÍNEZ JIMÉNEZ JUAN CARLOS

EN CODIRECCIÓN DE

M.C. MARTÍNEZ HERNÁNDEZ DOMITILLO

CUNDUACÁN, TABASCO, ABRIL - 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 07 del mes mayo del año 2025, el que suscribe Jesús Rodrigo Vargas Olán alumno del Programa de Ingeniería Electricista y Electrónico con número de matrícula 192D24012, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de Ingeniero Electricista y Electrónico y titulada COMPARATIVA DE TOPOLOGÍAS DEL CONVERTIDOR BUCK EN MODO DE CONDUCCIÓN CONTINUO dirigida por el M.C. Juan Carlos Martínez Jiménez.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 07 de mayo del 2025.

Nombre y Firma


Jesús Rodrigo Vargas Olán



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/0444/2025
FECHA: 02 de mayo de 2025.
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva.

C. JESÚS RODRIGO VARGAS OLÁN
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por el M.C JUAN CARLOS MARTÍNEZ JIMÉNEZ y el M.C. DOMITILLO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, titulado:

"COMPARATIVA DE TOPOLOGÍAS DEL CONVERTIDOR BUCK EN MODO DE CONDUCCIÓN CONTINUO".

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE


DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA-369
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008
Consorcio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 07 de mayo del 2025

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **COMPARATIVA DE TOPOLOGÍAS DEL CONVERTIDOR BUCK EN MODO DE CONDUCCIÓN CONTINUO**.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

Alumno

Jesús Rodrigo
Vargas Olán

COLABORADORES

Director de Tesis

M.C. Juan Carlos
Martínez Jiménez

Codirector de Tesis

M.C. Domitilo
Martínez Hernández

TESTIGOS

Dr. José Mauricio Rodríguez Valencia

Ernesto Zavala Jiménez

COMPARATIVA DE TOPOLOGÍAS DEL CONVERTIDOR BUCK EN MODO DE CONDUCCIÓN CONTINUO

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.itm.edu.co Internet	307 palabras — 2%
2	jcyta.cenidet.tecnm.mx Internet	265 palabras — 2%
3	hdl.handle.net Internet	226 palabras — 1%
4	fr.scribd.com Internet	225 palabras — 1%
5	qdoc.tips Internet	222 palabras — 1%
6	bibdigital.epn.edu.ec Internet	179 palabras — 1%
7	www.cenidet.edu.mx Internet	149 palabras — 1%
8	idoc.pub Internet	105 palabras — 1%
9	jupiter.utm.mx Internet	96 palabras — 1%
10	es.scribd.com Internet	87 palabras — 1%



COORDINACIÓN
DE ESTUDIOS
TERMINALES

Dedicatoria

A mis padres el Ing. Félix Vargas Hernández y la Lic.Esp. Ana Fanni Olán Sánchez por apoyarme incondicionalmente durante toda mi vida, guiarme por el camino correcto y siempre motivarme a alcanzar mis metas. A ustedes les debo todo lo que soy y seré, gracias dios por darme como padres dos personas tan ejemplares.

A mis Hermanos la M.A. Yutzill Darinka Vargas Olán y el Ing. Félix Gustavo Vargas Olán, quienes siempre me han brindado un apoyo emocional cuando más lo he necesitado y han sido mis cómplices de toda la vida.

A mi pareja la Lic. Roxana Gutiérrez Hernández quien ha estado para mí en mis peores y mejores momentos de mi vida, incentivándome a esforzarme cada día y brindándome un lugar seguro.

Agradecimientos

A dios por permitirme vivir esta experiencia, darme resiliencia y conocimiento para llegar hasta el final.

A mis asesores el M.C. Juan Carlos Martínez Jiménez y el M.C. Domitilo Martínez Hernández por brindarme su amistad y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores, el Dr. Jesús Gómez y el Dr. Mauricio Valencia, por compartir parte de sus conocimientos y amistad durante mi estancia en la UJAT.

A mis amigos, Jaime Alfonso, Fernando Méndez, Ernesto Zavala, Cristian Pereyra, Ronaldo Milla, Hilario Aniceto, Luis Jiménez, Erick Notario y Otilio Cortázar por ser mis cómplices y confidentes.

A mis mascotas Aknirad y Odie, quienes me acompañaron en esas noches de desvelo.

A mi casa de estudios, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), por prestarme sus instalaciones para para el desarrollo de este trabajo y hacer me crecer profesionalmente.

Índice de contenido

CAPÍTULO 1.....	18
1. Introducción.....	19
1.1. Antecedentes.....	20
1.3. Justificación.....	22
1.4. Pregunta de investigación.....	23
1.5. Hipótesis.....	23
1.6 Objetivo General.....	24
1.7 Objetivos Específicos.....	24
CAPÍTULO 2.....	25
2. Marco Teórico.....	26
2.1 Convertidor Buck Asíncrono.....	26
Modo de operación.....	27
2.2 Convertidor Buck Síncrono.....	29
Modo de Operación.....	30
2.3 Convertidor Buck Multifase.....	33
Convertidor Buck multifase Asíncrono.....	33
Convertidor Buck multifase Síncrono.....	36
CAPÍTULO 3.....	39
3. Metodología.....	40
3.1 Diseño del convertidor Buck.....	41
Ciclo de trabajo.....	41
Filtro LC.....	42
Selección de filtro LC.....	42
Parámetros de los interruptores.....	43
Selección de interruptores.....	44
3.2 Implementación de pulsos de disparo.....	46
FPGA SPARTAN-3A.....	46
Estructura de programación.....	47
Generación de frecuencia.....	47
Pulsos de disparo.....	48
Pulso superior S1.....	48

Pulso inferior S2	50
Pulso superior S3	51
Pulso inferior S4	52
3.3 Desarrollo de Placa de circuito impreso (PCB)	57
Diseño del convertidor en Altium Designer	57
Carga electrónica	62
CAPÍTULO 4	64
4. Resultados	65
4.1 Análisis teórico de pérdidas de potencia	65
Valores RMS del convertidor Buck	65
Interruptor S1 (superior)	66
Interruptor diodo (inferior)	67
Interruptor S1 (superior)	68
Interruptor S2 (inferior)	68
4.1. Simulaciones comparativas del convertidor Buck en MCC	79
Caso 1: Convertidor Buck monofase asíncrono en MCC	79
Caso 2: Convertidor Buck monofase síncrono en MCC	82
Caso 3: Convertidor Buck multifase Asíncrono en MCC	85
Caso 4: Convertidor Buck multifase síncrono en MCC	89
4.2 Implementación Física	94
Caso 1: Convertidor Buck monofase asíncrono en MCC	94
Caso 2: Convertidor Buck monofase síncrono en MCC	98
Caso 3: Convertidor Buck multifase Asíncrono en MCC	101
Caso 4: Convertidor Buck multifase síncrono en MCC	105
CAPÍTULO 5	112
5. Discusión	113
5.1. Disipación térmica en los componentes	114
Convertidor Buck monofase asíncrono	114
Convertidor Buck monofase síncrono	116
Convertidor Buck multifase asíncrono	116
Convertidor Buck multifase síncrono	117
CAPÍTULO 6	122

6. Conclusiones y recomendaciones	123
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de figuras

Figura 2.1. Convertidor Buck con rectificación asíncrona	27
Figura 2.2. (a) Circuito equivalente durante ton y (b) circuito equivalente durante $toff$	27
Figura 2.3. Diagrama de tiempo del convertidor Buck monofase en MCC	28
Figura 2.4. Convertidor Buck con rectificación síncrona	29
Figura 2.5. Pulsos de disparo del convertidor Buck síncrono.....	30
Figura 2.6. (a) Circuito equivalente durante ton (b) Circuito equivalente durante $toff$ (c) Circuito equivalente durante $tdead$	30
Figura 2.7. Diagrama de tiempo del convertidor Buck síncrono.....	32
Figura 2.8. Convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona.....	34
Figura 2.9. Diagrama de tiempo del convertidor Buck multifase	35
Figura 2.10. Rizo de corriente de los inductores del convertidor	36
Figura 2.11. Convertidor Buck multifase con rectificación síncrona	37
Figura 2.12. Diagrama de tiempo del convertidor Buck multifase en rectificación síncrona.....	38
Figura 3.1. Tarjeta de pruebas FPGA-3A.....	47
Figura 3.2. Generador de pulso de reloj	48
Figura 3.3. Pulso de disparo del interruptor superior $S1$	49
Figura 3.4. Gráfica de pulso del interruptor $S1$	49
Figura 3.5. Pulso de disparo del interruptor inferior $S2$	50
Figura 3.6. Gráfica de pulso del interruptor $S2$	50
Figura 3.7. Pulso de disparo del interruptor inferior $S3$	51
Figura 3.8. Gráfica de pulso del interruptor $S3$	52
Figura 3.9. Pulso de disparo del interruptor inferior $S4$	52
Figura 3.10. Gráfica de pulso del interruptor $S4$	53
Figura 3.11. Pulso de disparo de los interruptores para un convertidor Buck multifase dos fases	54
Figura 3.12. Pulso de disparo de los interruptores	55
Figura 3.13. Diagrama eléctrico del convertidor Buck multifase.....	56
Figura 3.14. Diagrama eléctrico del convertidor Buck multifase etapa de potencia	58
Figura 3.15. Etapa de pulsos de disparo	58

Figura 3.16. Diagrama de placa en el software Altium Designer	59
Figura 3.17. Diagrama 3D del convertidor Buck multifase (a) vista aérea (b) vista de costado	60
Figura 3.18. (a) Placa PCB del convertidor Buck multifase (b) Etapas del convertidor	61
Figura 3.19. Carga electrónica DL24 ATORCH	63
Figura 3.20. Sistema de prueba para convertidor Buck	63
Figura 4.1. Gráfica de corriente del inductor del convertidor Buck.....	66
Figura 4.2. Gráfica de corriente del interruptor S_1	66
Figura 4.3. Gráfica de corriente del interruptor diodo	67
Figura 4.4. Gráfica de corriente del interruptor S_2 en rectificación síncrona.....	69
Figura 4.5. Diagrama eléctrico del convertidor Buck Monofase con rectificación asíncrona.....	79
Figura 4.6. Pulso de disparo del convertidor Buck monofase asíncrono	79
Figura 4.7. Señales de corriente y voltaje de entrada del Convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona.....	80
Figura 4.8. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona en MCC	81
Figura 4.9. Señales de corriente y voltaje de salida del Convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona.....	81
Figura 4.10. Diagrama eléctrico del convertidor Buck monofase con rectificación síncrona.....	82
Figura 4.11. Pulsos de disparo del convertidor Buck monofase síncrono.....	83
Figura 4.12. Señales de corriente y voltaje de entrada del Convertidor Buck monofase con rectificación síncrona.....	83
Figura 4.13. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación síncrona en MCC	84
Figura 4.14. Señales de corriente y voltaje de salida del convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona.....	84
Figura 4.15. Diagrama eléctrico del Convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona.....	85
Figura 4.16. Pulsos de disparo del convertidor Buck multifase asíncrono	86
Figura 4.17. Señales de corriente y voltaje de entrada del convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona.....	86
Figura 4.18. Señales de corrientes de los inductores en un convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona en MCC.....	87

Figura 4.19. Señales de corriente y voltaje de salida del convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona.....	88
Figura 4.20. Diagrama eléctrico del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona.....	89
Figura 4.21. Pulsos de disparo del convertidor Buck multifase síncrono	89
Figura 4.22. Señales de corriente y voltaje de entrada del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona.....	90
Figura 4.23. Señales de corrientes de los inductores en un convertidor Buck multifase con rectificación síncrona en MCC.....	91
Figura 4.24. Señales de corriente y voltaje de salida del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona.....	91
Figura 4.25. Pulso del interruptor superior.....	94
Figura 4.26. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de fuente de alimentación	95
Figura 4.27. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona en MCC	96
Figura 4.28. (a) Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor.....	97
Figura 4.29. Pulsos de los interruptores superior e inferior	98
Figura 4.30. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de la fuente de alimentación convertidor	99
Figura 4.31. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación síncrona en MCC	100
Figura 4.32. (a) Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor.....	100
Figura 4.33. Pulsos de los interruptores superiores	102
Figura 4.34. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de fuente de alimentación del convertidor	102
Figura 4.35. (a) señal de corriente del inductor $L1$ (b) señal de corriente del inductor $L2$	103
Figura 4.36. (a) Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor.....	104
Figura 4.37. Pulsos de los interruptores	106
Figura 4.38. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de fuente de alimentación del convertidor	106

Figura 4.39. (a) Señal de corriente del inductor $L1$ (b) Señal de corriente del inductor $L2$	107
Figura 4.40. Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor	108
Figura 5.1. Gráfica comparativa de eficiencias de los convertidores Buck en implementación física	114
Figura 5.2. (a) Temperatura del interruptor S (b) temperatura del interruptor D ..	115
Figura 5.3. (a) Temperatura del inductor L (b) temperatura del capacitor C	115
Figura 5.4. (a) Temperatura del interruptor $S1$ (b) temperatura del interruptor $S2$	116
Figura 5.5. (a) Temperatura del interruptor $S1$ (b) temperatura del interruptor $D1$ (c) temperatura del interruptor $S2$ (d) temperatura del interruptor $D2$	117
Figura 5.6. (a) Temperatura del interruptor $S1$ (b) temperatura del interruptor $S2$ (c) temperatura del interruptor $S3$ (d) temperatura del interruptor $S4$	118
Figura 5.7. (a) Temperatura del capacitor del convertidor (b) temperatura del inductor $L1$ (c) temperatura del inductor $L2$	119

Índice de tablas

Tabla 2.1. Clasificación del convertidor Buck.....	26
Tabla 3.1. Parámetros de diseño del convertidor.....	41
Tabla 3.2. Ciclo de trabajo.....	42
Tabla 3.3. Cálculo del filtro LC multifase.....	42
Tabla 3.4. Características del filtro LC	43
Tabla 3.5. Parámetros de pulsos para los interruptores sup e inf	43
Tabla 3.6. Desfase del convertidor.....	44
Tabla 3.7. Parámetros eléctricos de los interruptores.....	45
Tabla 3.8. Características de los interruptores.....	45
Tabla 3.9. Habilidad de pulsos por topología	56
Tabla 3.10. Características de la carga.....	62
Tabla 4.1. Ecuaciones de corriente rms para el convertidor Buck.....	71
Tabla 4.2. Pérdidas Teóricas	77
Tabla 4.3. Comparación de resultados de simulaciones	93
Tabla 4.4. Mediciones físicas	94
Tabla 4.5. Comparación de resultados físicos	110
Tabla 4.6. Pérdidas de potencia teórica, simulación e implementación física.....	111
Tabla 5.1. Mediciones de temperatura.....	121

Resumen

En los últimos años ha existido un amplio crecimiento de aplicaciones de la electrónica, donde se busca adecuar los niveles de voltaje, corriente, potencia y eficiencia energética para sistemas eléctricos de baja potencia; por lo que los convertidores conmutados han sido objeto de estudio, debido a que estos pueden ser adecuados a las necesidades de la carga. En particular el convertidor Buck es ampliamente utilizado en aplicaciones de baja y alta potencia, como Unidad Central de Procesamiento (CPU's), periféricos, dispositivos móviles, sólo por mencionar algunos. Sin embargo, cuando se requiere demanda de corrientes elevadas los diseños convencionales disminuyen su eficiencia debido a las pérdidas ocasionadas en los elementos que conforman el diseño del circuito eléctrico, por lo que se propone en dividir la corriente en múltiples etapas para aumentar la eficiencia del convertidor disminuyendo el calentamiento y las pérdidas ocasionadas en los componentes.

En este trabajo se presenta una comparativa por medio de simulaciones e implementación física del comportamiento del convertidor Buck en modo de conducción continuo en cuatro casos de estudio, topología monofase con rectificación asíncrona y síncrona, así como multifase en rectificación asíncrona y síncrona. El estudio consiste en analizar las diferentes variables eléctricas de cada topología (voltaje de entrada, corriente de entrada, voltaje de salida, corriente de salida y eficiencia del convertidor). Los resultados del análisis mostraron que la topología multifase es más eficiente que la monofase, debido a la división de corriente entre etapas del convertidor y que la rectificación síncrona es más eficiente que la asíncrona, ya que en la rectificación síncrona existen menos pérdidas de potencia y menor estrés térmico entre componentes.

Palabras clave

Buck, asíncrona, síncrona, monofase y multifase.

Abstract

In recent years there has been a wide growth in electronic applications, where voltage, current, power and efficiency levels are sought to be adjusted to low power electrical systems, the buck converter has been studied, due to maybe suitable for the load's need. In particular the Buck converter is widely used in low power applications, like Central Processing Unit (CPU), peripherals, Movil drivers, to mention few, however, when required high current, the conventional Buck convert has low efficiency for the power losses in the drivers, for that the proposal is current division in multiphases to efficiency increase in converters, that form have a low power losses and heating in drivers.

This paper presents a comparison by simulations and psychic implementation of behavior of buck converter in continuous conduction in four case study, single phase topology with rectification asynchronous and synchronous, as well as multiphases topology with rectification asynchronous and synchronous, the study consists of analyzing the different electrical variables of each topology (input voltage, input current, output voltage, output current and efficiency). The results of analysis showed that the multiphases topology is more efficient than the single-phase topology, due to the current division between converter stages and that synchronous rectification is more efficient than asynchronous rectification, since in synchronous rectification there are fewer power losses and less thermal stress between components.

Key words

Buck, asynchronous, synchronous, single-phase and multiphase

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Con el avance tecnológico en los últimos años de los dispositivos electrónicos se han desarrollado nuevas técnicas y topologías electrónicas que han permitido mejorar: el diseño constructivo, la eficiencia, tiempo de respuesta y optimización, solo por mencionar algunas. Actualmente el ahorro de energía es primordial en cualquier equipo eléctrico y electrónico, debido a que se busca mejorar la eficiencia energética al reducir las pérdidas de potencia

Los convertidores (Corriente Directa a Corriente Directa) CD-CD son topologías de electrónica de potencia con un amplio rango de usos. Su función es adaptar la naturaleza de la energía eléctrica a las necesidades de la carga, entregando la energía requerida, minimizando las pérdidas asociadas por los componentes pasivos y de estado sólido. Dependiendo de la configuración del convertidor elegida, puede funcionar como: reductor, elevador o reductor-elevador. En el caso particular que la tensión aplicada a la entrada sea menor que la entregada a la carga se le conoce como convertidor Buck (Sierra Florencio Tutor & Garcerá Sanfeliú, 2018).

El convertidor Buck, es uno de los dispositivos de conversión de energía más utilizados en aplicaciones, donde se requiere reducir el voltaje en corriente directa con alta eficiencia, reduciendo las pérdidas de potencia asociadas por la conmutación del interruptor y efecto Joule, obteniendo en ocasiones eficiencias por arriba del 96% en el convertidor. Existen dos variantes del convertidor, dependiendo del elemento semiconductor elegido, en el caso de tener un elemento controlado Transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) y otro no controlado el cuál es un Diodo se le conoce como asíncrono y en caso de tener dos elementos controlados MOSFET se le conoce como síncrono.

1.1. Antecedentes

Verde et al. (2021), realizó una comparativa en simulaciones, sobre el comportamiento del convertidor Buck síncrono monofase y del convertidor Buck multifase (cinco fases), donde se analizaron características como; rizo de corriente, ciclo de trabajo y corriente de fase. En ambas topologías se obtiene el mismo resultado, es decir la misma corriente de salida, sin embargo, la topología multifase alcanza la corriente nominal en un tiempo más corto siendo cinco veces más rápido que la topología mono fase, adicionando que la corriente que circula por cada una de las fases es inferior a la topología de una sola fase.

Vilchis Juan Carlos (2009), hizo un análisis sobre la estructura multifase de los convertidores Buck con rectificación síncrona, donde se comparan dos modos de conducción continuo y discontinuo, con la finalidad de mejorar la eficiencia de la tecnología LPIA INTEL. Las pérdidas de potencia en el convertidor Buck síncrono (CBS) se deben a tres tipos principales de pérdidas; pérdidas por conducción que dependen directamente de la corriente de salida, pérdidas por la frecuencia que dependen de la operación del MOSFET y pérdidas adicionales que son las pérdidas de las compuertas de los dispositivos MOSFET.

Enríquez Edwin Fabricio (2018), elaboró un estudio experimental de la eficiencia del convertidor Buck síncrono, donde la eficiencia fue analizada con diferentes técnicas de diseño de Gate Driver y Red de Snubber, con la finalidad de establecer la técnica que produce un mejor grado de eficiencia para el convertidor Buck síncrono, la mayor eficiencia se consiguió cuando no hay una red de Snubber en las terminales del MOSFET de potencia.

Estrada Velásquez et al (2015), diseñó y realizó un convertidor Buck síncrono de 200 W a una frecuencia de 100 kHz con implementación en el uso de energías renovables, para la obtención de resultados más eficientes. En primera instancia, se realizaron simulaciones y posteriores pruebas de montajes experimental.

Pacheco Arnoldo (2007), consiguió un modelo matemático de pérdidas de potencia del convertidor Buck síncrono en modo de conducción continuo, donde se conocen los principales factores que afectan a la eficiencia de los convertidores en

la implementación de aplicaciones móviles. Los mayores puntos de influencia en la eficiencia del convertidor se encuentran en los dispositivos de conmutación MOSFET, debido al manejo de compuertas del dispositivo además de la recuperación inversa del diodo parasito que se encuentra en el dispositivo.

Ghani et al. (2022), realizó un análisis de pérdidas de potencia del convertidor Buck multifase CD-CD con potencia de salida 20 W hasta 250 W usando el software OrCAD PSpice. Donde se menciona que la frecuencia de conmutación es el mayor factor de las pérdidas de conmutación. Se encontró que las perdidas por conducción son las mayores pérdidas en el convertidor Buck multifase, por lo cual para solucionar este problema se necesita cambiar los diodos de la rectificación por dispositivos MOSFET, sin embargo, la inclusión de estos dispositivos aumentara el costo de producción y aumentara la complejidad del convertidor.

Klein Jon (2014), realizó un modelo matemático sobre las pérdidas de potencia en los conmutadores de los convertidores Buck síncronos con dispositivos MOSFET, menciona que los dispositivos MOSFET superior e inferior del convertidor se comportan de manera distinta, donde las mayores pérdidas por conducción se encuentran en MOSFET inferior.

1.3. Justificación

Ante la creciente demanda del uso y aprovechamiento de la energía eléctrica, se han buscado alternativas para generar, adecuar y optimizar el consumo energético, por eso el uso de la electrónica de potencia se ha incrementado en los sistemas eléctricos de potencia y equipos residenciales. En la actualidad las fuentes conmutadas han tenido un amplio uso, siendo estos objetos de estudio de diversas investigaciones donde se busca minimizar las pérdidas asociadas a los elementos pasivos y semiconductores con los que se construyen estas topologías. En este contexto, el convertidor Buck es utilizado en aplicaciones donde los requerimientos de eficiencia en términos de potencia son importantes en las que destacan: vehículos híbridos, computadoras, equipos de telefonía, Field Programmable Gate Array (FPGA's), sólo por mencionar algunos. Por lo que requiere adecuaciones de voltaje y corriente que permitan incrementar la eficiencia del convertidor; una alternativa viable es dividir la corriente en múltiples etapas y así disminuir el estrés térmico en los componentes y la reducción de pérdidas ocasionadas por efecto Joule. Si bien es cierto que incrementa el costo de fabricación del convertidor, debido al aumento de la cantidad de componentes, esto no resulta desfavorable dado que permite el incremento de eficiencia del convertidor y la confiabilidad. La viabilidad de la aplicación de esta técnica dependerá de la aplicación donde se implementará la topología.

1.4. Pregunta de investigación

¿Cómo se comportan los parámetros eléctricos de voltaje, corriente, potencia de entrada, potencia de salida y eficiencia en el convertidor Buck (monofase asíncrono, monofase síncrono, multifase asíncrono y multifase síncrono) en aplicaciones de baja potencia?

1.5. Hipótesis

La eficiencia de un convertidor Buck en modo de conducción continuo puede mejorar dependiendo de la topología implementada, por lo cual se espera que la rectificación síncrona otorgue mayor eficiencia que la asíncrona, al igual que se supone que implementación de múltiples fases en el convertidor reduzca la corriente que circula en cada componente.

1.6 Objetivo General

Analizar topologías del convertidor Buck en modo de conducción continuo realizando la comparativa en términos de eficiencia.

1.7 Objetivos Específicos

- Diseñar un convertidor Buck en modo de conducción continuo monofase y multifase de dos fases en rectificación asíncrona y síncrona.
- Simular las diferentes topologías del convertidor Buck en software de circuitos eléctricos, para el análisis de su comportamiento en términos de eficiencia.
- Implementar un prototipo físico del convertidor, para validar los resultados.

CAPÍTULO 2

2. Marco Teórico

Los convertidores CD-CD son dispositivos electrónicos cuya función es transformar un voltaje continuo en otro voltaje continuo de diferente valor (Hart Daniel W., 2001).

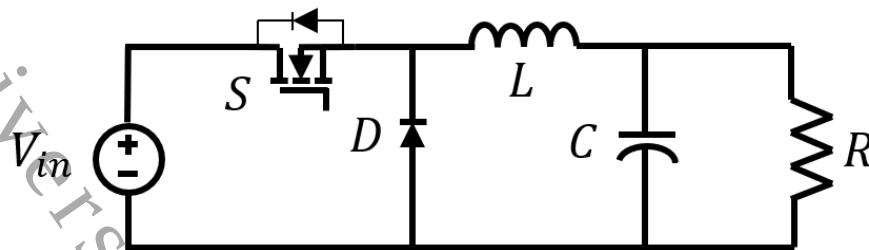
Un convertidor Buck, o convertidor CD-CD reductor, se emplea frecuentemente en situaciones donde se necesita una salida con un voltaje bajo y una corriente alta, en comparación con el voltaje de entrada. (Enríquez Edwin Fabricio, 2018). Dependiendo de su aplicación se elige la configuración adecuada del convertidor para la cual pueden existir las siguientes: convertidor monofase y multifase, dependiendo de la rectificación, si el dispositivo semiconductor del interruptor inferior utilizado es controlado o no controlado se clasifica en síncrono o asíncrono, tal como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación del convertidor Buck	
Buck Monofase	Buck Multifase
Asíncrono	Asíncrono
Síncrono	Síncrono

2.1 Convertidor Buck Asíncrono

El convertidor Buck se usa comúnmente en aplicaciones que necesitan un voltaje de salida inferior al de la fuente de entrada. Esta topología requiere una sola señal de control (interruptor superior S). El tiempo de conducción complementario está a cargo de un diodo D, tal como se puede apreciar en la Figura 2.1. A esta topología se le nombra Buck con rectificación asíncrona (Verde et al., 2021).

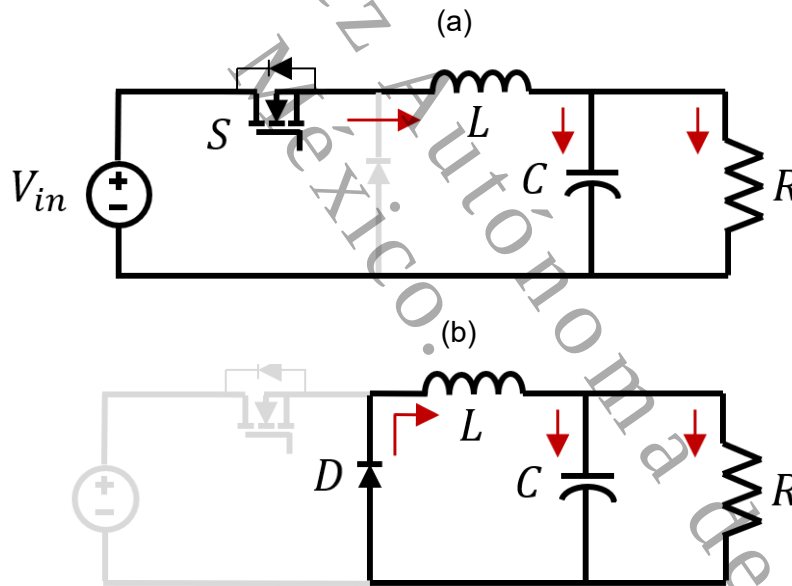
Figura 2.1. Convertidor Buck con rectificación asíncrona



Modo de operación

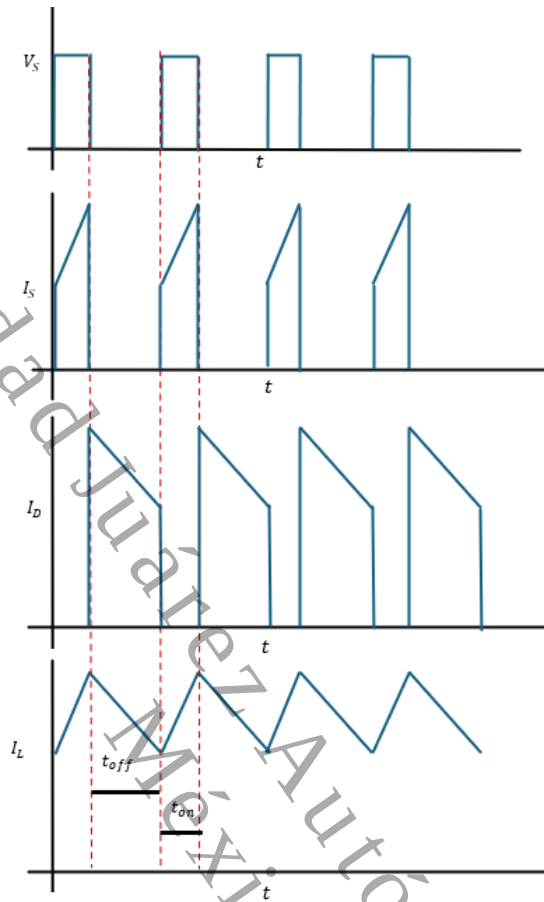
El convertidor Buck asíncrono en modo de conducción continuo cuenta con dos circuitos equivalentes que corresponden al tiempo de encendido t_{on} y al tiempo de apagado t_{off} del interruptor S los cuales se muestran la Figura 2.2.

Figura 2.2. (a) Circuito equivalente durante t_{on} y (b) circuito equivalente durante t_{off}



En la Figura 2.3 se muestra un diagrama de tiempo del comportamiento de la corriente del convertidor durante ambos tiempos encendido y apagado.

Figura 2.3. Diagrama de tiempo del convertidor Buck monofase en MCC



En el tiempo t_{on} se activa el interruptor S y el diodo D se encuentra apagado, durante este tiempo el inductor L se carga hasta un valor de corriente máximo. También existe transferencia de energía de la fuente de entrada V_{in} hacia la carga de salida R , la Figura 2.2 (a) muestra el circuito equivalente para este intervalo de tiempo (Pacheco Arnoldo, 2007).

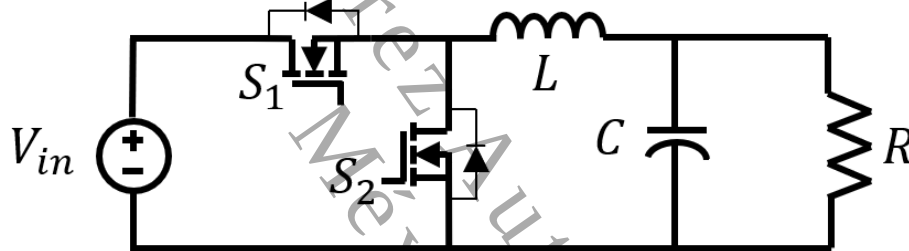
Durante el tiempo t_{off} , se apaga el interruptor S y debido a que la corriente en el inductor no puede cambiar abruptamente su dirección, se enciende el diodo D . En el transcurso del tiempo el inductor L suministra energía a R , aunque también existe una contribución del capacitor C ; la Figura 2.2(b) muestra el circuito equivalente para este intervalo de tiempo (Pacheco Arnoldo, 2007).

2.2 Convertidor Buck Síncrono

En la Figura 2.4, se muestra el circuito del convertidor Buck síncrono, el cual es una variante del convertidor Buck, el cual reemplaza al interruptor diodo por un interruptor controlado. La rectificación síncrona busca aumentar la eficiencia del convertidor y permitir el uso del diodo adicional del dispositivo semiconductor en aplicaciones que necesiten flujo de corriente bidireccional. (Estrada Velásquez et al., 2015)

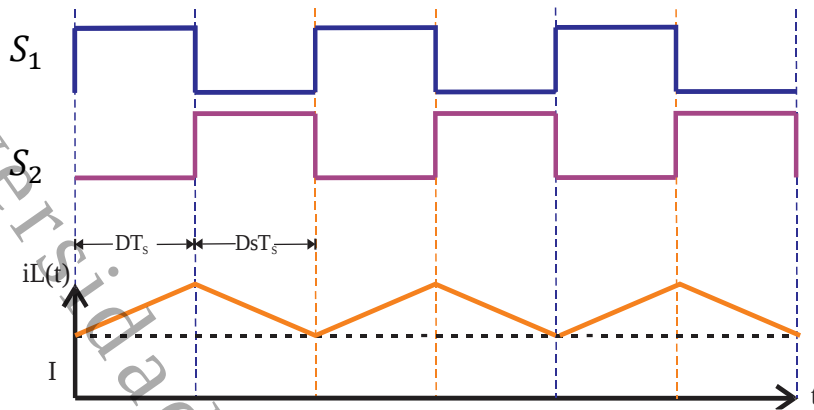
En la Figura 2.4 existen dos interruptores siendo, S_1 el interruptor superior, mientras S_2 representa el interruptor inferior.

Figura 2.4. Convertidor Buck con rectificación síncrona



En la Figura 2.5, se observa los pulsos de disparos del convertidor Buck síncrono, siendo S_1 el pulso del interruptor superior y S_2 el del inferior respectivamente, siendo este último, el complemento de la señal de disparo del convertidor, es decir $D_s T_s$. También se observa la gráfica de corriente del inductor con una relación de corriente-tiempo, donde esta depende de los disparos de los interruptores respectivamente.

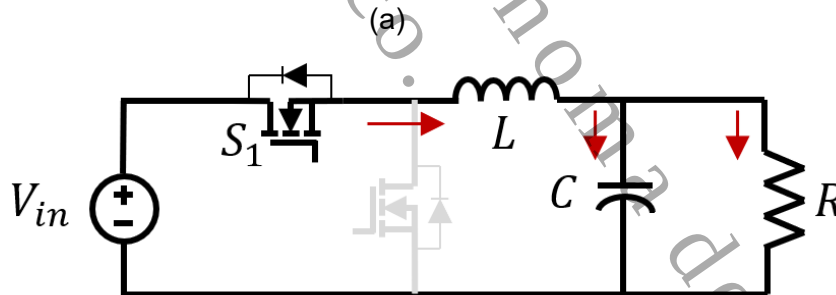
Figura 2.5. Pulsos de disparo del convertidor Buck síncrono

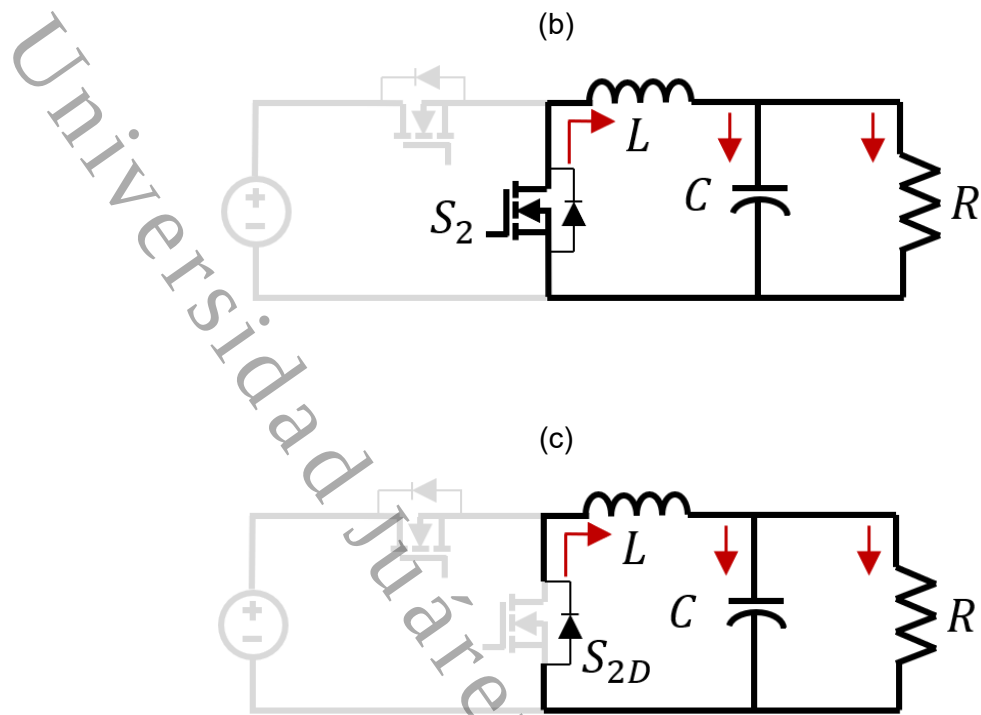


Modo de Operación

En el caso de la topología síncrona se presentan tres circuitos equivalentes durante su operación t_{on} , t_{off} , y t_{dead} (tiempo muerto) tal y como se muestra en la Figura 2.6.

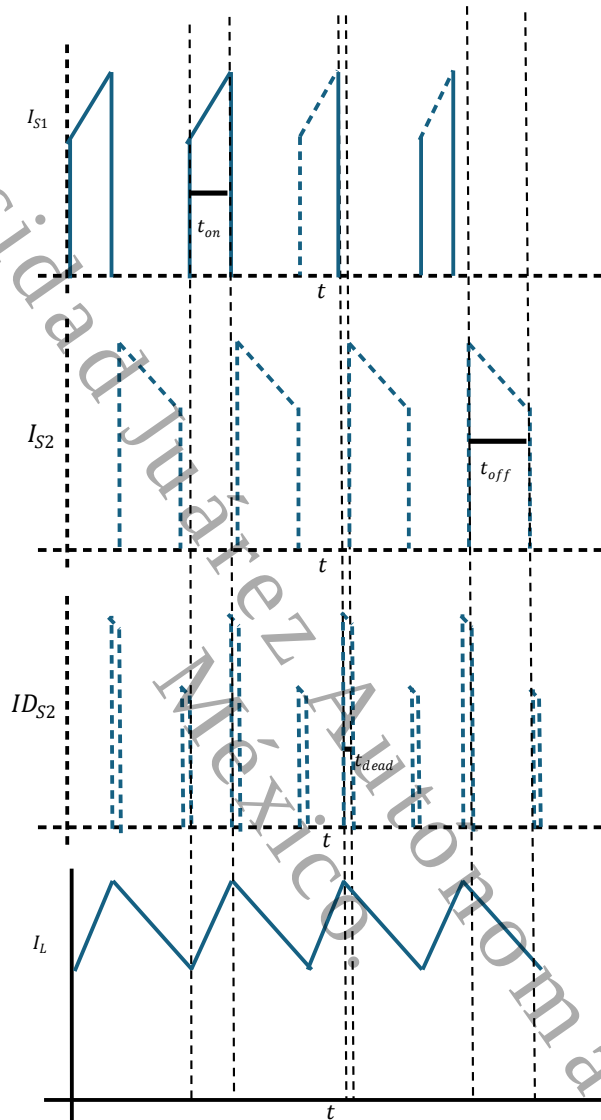
Figura 2.6. (a) Circuito equivalente durante t_{on} (b) Circuito equivalente durante t_{off} (c) Circuito equivalente durante t_{dead}





En la Figura 2.7 se muestra un diagrama de tiempo del comportamiento de las corrientes del convertidor, mostrando el tiempo de encendido, el tiempo de apagado y el tiempo muerto.

Figura 2.7. Diagrama de tiempo del convertidor Buck síncrono



Durante el tiempo t_{on} se enciende el MOSFET S_1 y S_2 se mantiene apagado, en este tiempo se carga el inductor L y existe una transferencia de energía de la entrada hacia R . En la Figura 2.6 (a) se muestra el circuito equivalente (Pacheco Arnoldo, 2007).

En el intervalo de encendido de S_2 ; como la caída de voltaje a través del MOSFET es menor que el voltaje de conducción del diodo parásito, éste se apaga

y la corriente I_L circula por el canal del MOSFET. La Figura 2.6 (b) muestra el circuito equivalente (Pacheco Arnoldo, 2007).

En T_{dead} se apaga el MOSFET S_1 y el diodo parásito del MOSFET S_2 se enciende, debido al flujo de la corriente I_L ; en este intervalo el inductor se encuentra descargándose, la Figura 2.6 (c) muestra el circuito equivalente. Ya que existen dos tiempos muertos en la señal de control, el circuito de tiempo muerto se presenta en dos ocasiones, así como observa en la Figura x.(Pacheco Arnoldo, 2007).

2.3 Convertidor Buck Multifase

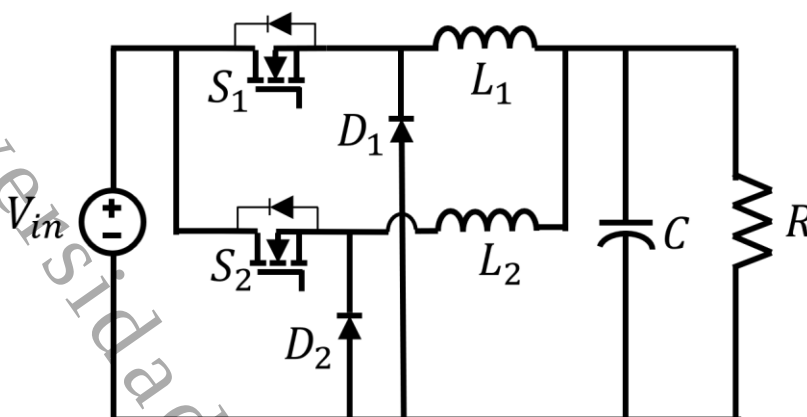
Los convertidores Buck monofase de corriente continua presentan ciertas desventajas, especialmente en aplicaciones de alta corriente. En tales casos, el tamaño de los inductores se incrementa, lo que conlleva mayores pérdidas de energía y afecta notablemente a la eficiencia del convertidor (Ghani et al., 2022).

Un convertidor multifase está compuesto por múltiples convertidores idénticos conectados en paralelo, cuyas señales de control están desfasadas temporalmente. Esto permite que cada convertidor demande energía en diferentes momentos y la suministre a la salida en tiempos distintos (Verde et al., 2021).

Convertidor Buck multifase Asíncrono

La Figura 2.8 presenta la topología multifase (dos fases) de un convertidor Buck con rectificación síncrona, por lo cual solo se requiere del control de dos interruptores (interruptores superiores), siendo estos los interruptores superiores S_1 y S_2 .

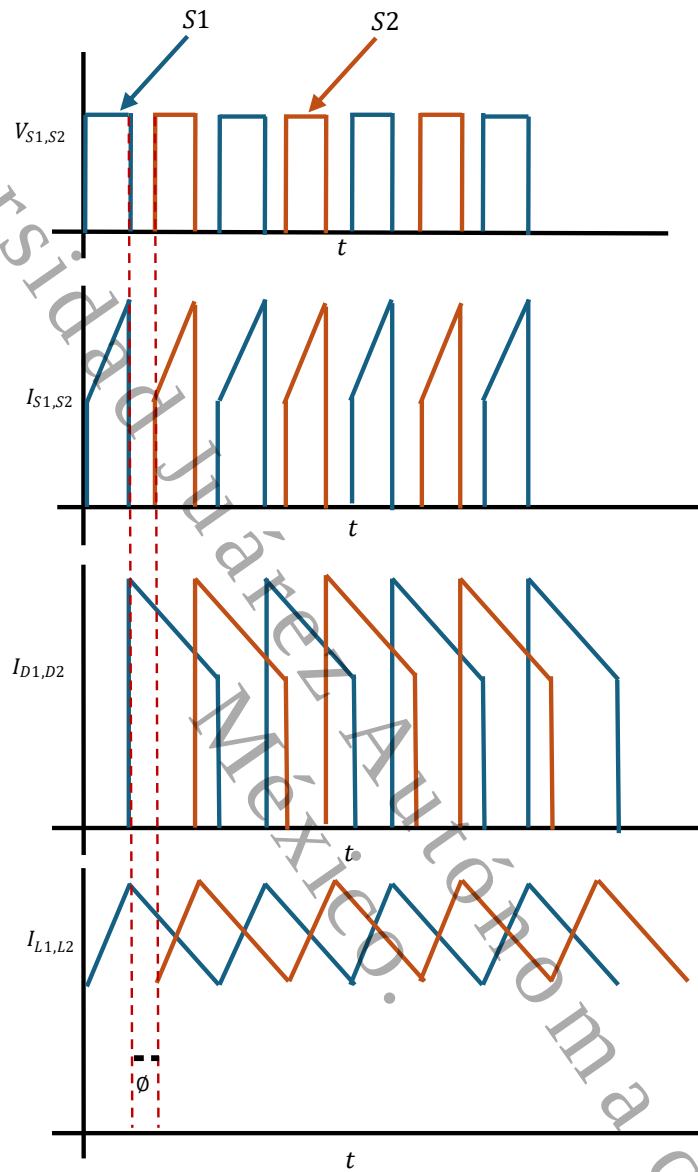
Figura 2.8. Convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona



Los modos de operación de los convertidores multifase son similares a los convertidores monofase, donde los circuitos equivalentes en su modo de operación dependerán de su tipo de rectificación.

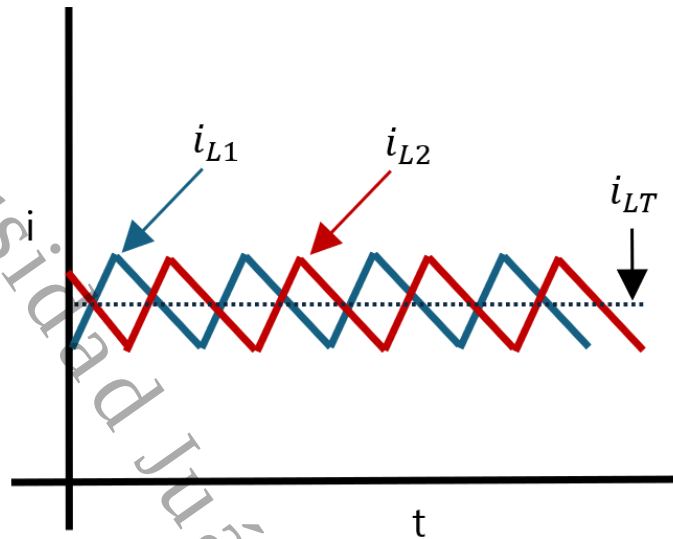
En la Figura 2.9 se muestra un diagrama de tiempo del convertidor Buck multifase, donde se observa que los pulsos de disparo controlados se encuentran desfasados $\varnothing$ de acuerdo con el número de etapas del convertidor, por lo cual los diodos se encontraran desfasados de igual manera al activarse en el tiempo de apagado de su interruptor controlado correspondiente.

Figura 2.9. Diagrama de tiempo del convertidor Buck multifase



La integración de múltiples fases en el convertidor permite dividir la corriente, por lo cual la corriente que circula a través de los inductores será de menor magnitud que en una topología monofase, sin embargo, es importante mencionar que esta se encuentra desfasada al igual que los pulsos de disparo, lo cual permite que en un caso ideal el rizo de corriente total de los inductores tienda a cero, como se muestra en la Figura 2.10.

Figura 2.10. Rizo de corriente de los inductores del convertidor

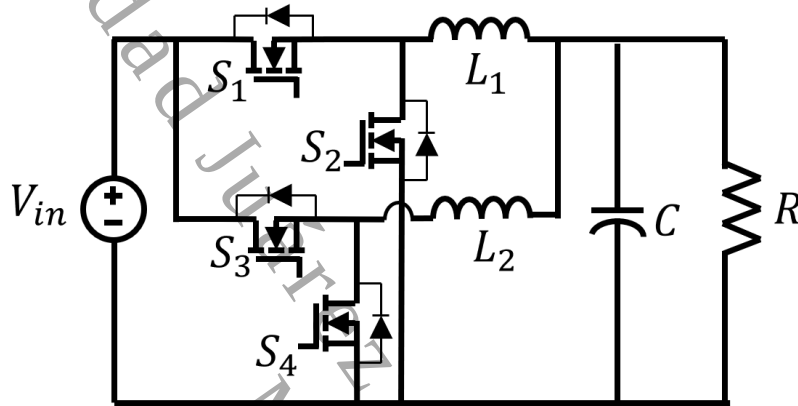


Convertidor Buck multifase Síncrono

La topología multifase que se muestra en la Figura 2.11, consiste en utilizar varios convertidores conectados en paralelo, se sincronizan a través de las señales de disparo de cada interruptor (superior e inferior) obteniendo el mismo voltaje de salida. La ventaja aportada por la topología multifase es que, a igualdad de potencia requerida, el estrés térmico por cada uno de los convertidores se reduce debido a la distribución del flujo de corriente. Por otro lado, El principal problema de esta configuración es la complejidad del control, ya que los interruptores deben estar sincronizados a través de señales de control desfasadas, según el número de fases. (Garcia Maria Pilar, 2015).

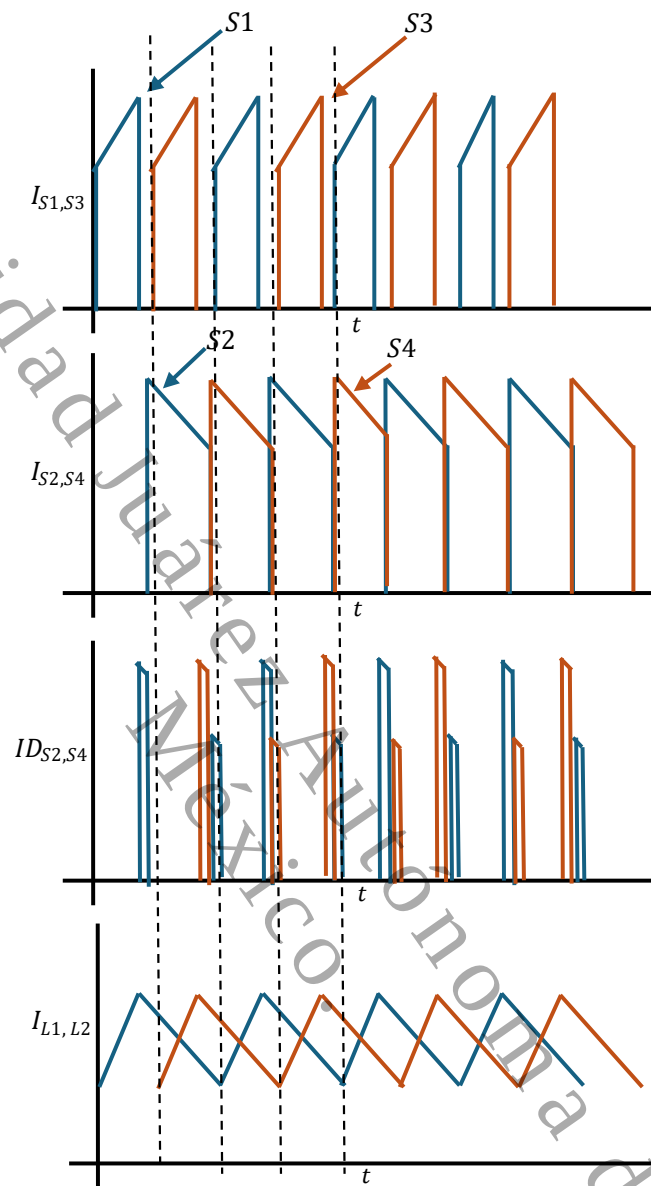
En la Figura 2.11 se observan cuatro interruptores correspondientes a un convertidor Buck multifase síncrono de dos fases, donde el S_1 y S_3 son los interruptores superiores desfasados entre ellos de acuerdo con numero de fases del convertidor, mientras que S_2 y S_4 son los interruptores inferiores complementarios de acuerdo con cada fase.

Figura 2.11. Convertidor Buck multifase con rectificación síncrona



En la Figura 2.12 se muestra un diagrama de tiempo del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona, donde se observa el comportamiento de corriente de los interruptores al estos ser controlados y desfasados.

Figura 2.12. Diagrama de tiempo del convertidor Buck multifase en rectificación síncrona



CAPÍTULO 3

3. Metodología

A continuación, se exponen los pasos realizados para el desarrollo de este proyecto.

- Análisis teórico del convertidor Buck: Se realizó el diseño teórico del convertidor basado en los parámetros propuestos,
- Selección de componentes: Usando como guía los valores del diseño de convertidor se calculó y selecciono los componentes para la implementación.
- Implementación de pulsos de disparo: Se elaboró un código para los tiempos de encendido y apagado de los interruptores del convertidor.
- Desarrollo de placa de circuito impreso: Se diseño la placa PCB para el convertidor Buck, en la cual se hicieron las pruebas de los casos mencionados.
- Análisis teórico de pérdidas de potencia: Usando las guías de los fabricantes se calcularon las pérdidas de potencia en cada caso del convertidor enfocadas principalmente en los interruptores.
- Simulación: se elaboraron las simulaciones con los parámetros propuestos y los calculados.
- Implementación física: Con la simulación realizada se continuo con la implementación del prototipo para la corroboración de datos obtenidos.

3.1 Diseño del convertidor Buck

Para el diseño del convertidor primero se establecieron los parámetros de diseño que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros de diseño del convertidor		
Parámetros	Símbolo	Valor
Voltaje de entrada	V_{in}	30 V
Voltaje de salida	V_o	6 V
Corriente de entrada	I_{in}	1.2 A
Rizo de voltaje de salida	ΔV_o	0.14%
Frecuencia de conmutación	f	150 kHz
Corriente de salida	I_o	6 A
Rizo de corriente del inductor	Δi_L	7%
Número de fases	n	2
Potencia de salida	P_{in}	30 W

Una vez conociendo los parámetros ya establecidos se procede a calcular las características de cada componente.

Ciclo de trabajo

En los convertidores conmutados el ciclo de trabajo (D) es esencial, debido a que de este depende el tiempo de encendido del interruptor superior y con ello la modificación de voltaje de salida, para el caso del convertidor monofase asíncrono únicamente se requiere este pulso de disparo, dado que el interruptor inferior es un diodo que se activa cuando se encuentra polarizado en directa. Los cálculos D se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Ciclo de trabajo
Ciclo de trabajo (Ø)
$D = \frac{V_o}{V_{in}}$
$D = \frac{6}{30}$
$D = 0.2$

Filtro LC

Los convertidores Multifase basados en el convertidor Buck se diseñan bajo condiciones similares que un convertidor Buck monofase (Edwin, 2018), por lo tanto, se utilizan las mismas ecuaciones para determinar el valor del filtro LC, con la diferencia que en los convertidores multifase la corriente de la inductancia se divide entre el número de fases. En la Tabla 3.3 se muestran los cálculos de un filtro LC para un convertidor de dos fases.

Tabla 3.3. Cálculo del filtro LC multifase			
Inductor (L)	Diferencia de potenciales del Inductor (ΔIL)	Diferencia de potenciales del capacitor (ΔVc)	Capacitor (C)
$L = \frac{n(v_{in} - v_o)D}{\Delta IL \cdot f}$	$\Delta IL = \Delta iL \cdot I_o$	$\Delta Vc = \Delta V_o \cdot V_o$	$C = \frac{(v_{in} - v_o)D}{8 \cdot \Delta Vc \cdot L \cdot f^2}$
$L = \frac{(30 - 6) \cdot 0.2 \cdot 2}{0.41895 \cdot 1.5 \times 10^5}$	$\Delta IL = 0.07 \cdot 6$	$\Delta Vc = 0.00145 \cdot 6$	$C = \frac{(30 - 6) \cdot 0.2}{8 \cdot 0.0087 \cdot 152 \times 10^{-6} \cdot (1.5 \times 10^5)^2}$
$L = 152 \times 10^{-6} \text{ H}$	$\Delta IL = 418.95 \text{ mA}$	$\Delta Vc = 8,728 \text{ mV}$	$C = 20 \times 10^{-6} \text{ F}$

Selección de filtro LC

Para seleccionar los componentes del filtro LC se toman en cuenta los parámetros calculados en la Tabla 3.3, por lo cual se seleccionó un capacitor

electrolítico de $220 \mu F$, mientras que las características del inductor elaborado se encuentran en la Tabla 3.4. Para el diseño del inductor se utilizó el método de la constante geométrica, se consideraron los datos presentados en la Tabla 3.4

Tabla 3.4. Características del filtro LC	
Capacitor	Inductor
Capacitor electrolítico de $220 \mu F$	Núcleo = ETD29/16/10
	Número de vueltas = 50
	Entrehierro = 1.54 mm
	Calibre del cable = 16
	Área de sección transversal = 0.76 cm^2

Parámetros de los interruptores

El tiempo de encendido del interruptor superior dependerá del ciclo de trabajo, lo que corresponde al 20% del periodo total de la señal de disparo, cabe mencionar que para la topología monofase síncrona se requiere un disparo adicional, donde controla al interruptor inferior S_2 , el cual es una señal complementaria a la señal del interruptor superior S_1 , es decir (1-D) T_s (Gómez, 2021). En la Tabla 3.5 se muestra el cálculo de los tiempos de operación para el interruptor superior e inferior.

Tabla 3.5. Parámetros de pulsos para los interruptores sup e inf		
Periodo (T)	Tiempo de encendido (ton)	Tiempo de apagado (toff)
$T = \frac{1}{f}$	$ton = D \cdot T$	$toff = T - ton$
$T = \frac{1}{1.5 \times 10^5}$	$ton = 0.2 \cdot 6.6 \times 10^{-6} \text{ s}$	$toff = 6.6 \times 10^{-6} - 1.32 \times 10^{-6} \text{ s}$
$T = 6.6 \times 10^{-6}$	$ton = 1.32 \times 10^{-6} \text{ s}$	$toff = 5.28 \times 10^{-6} \text{ s}$

En la topología multifase, se utilizan los mismos parámetros de pulso para los interruptores que se usan la topología monofase, añadiendo un desfase (retardo) de acuerdo con el número de etapas del convertidor. la Tabla 3.6 muestra el desfase entre los pulsos de los interruptores por fase.

Tabla 3.6. Desfase del convertidor	
Desfase ($\emptyset$)	
$\emptyset = \frac{360^\circ}{n}$	
$\emptyset = \frac{360^\circ}{2}$	
$\emptyset = 180^\circ$	

Selección de interruptores

En la Tabla 3.7 se muestra el cálculo de las capacidades eléctricas que deben poseer los interruptores del convertidor, como los son corriente pico y tensión máxima, tomando en cuenta los parámetros de diseño. Es importante mencionar que dichos parámetros calculados son utilizados para los interruptores de los cuatro casos del convertidor que se abordan en este trabajo.

Tabla 3.7. Parámetros eléctricos de los interruptores	
Corriente pico en el interruptor (ipkQ)	Tension maxima en el interruptor (VDS OFF)
$ipkQ = i_o + \frac{(v_{in} - v_o)D}{2 \cdot L \cdot f}$	$VDS\ OFF = V_{in}$
$ipkQ = 6 + \frac{(30 - 6)0.2}{2 \cdot 76.38 \times 10^{-6} \cdot 1.5 \times 10^5}$	
$ipkQ = 6.209\ A$	$VDS\ OFF = 30\ V$

En este diseño se utilizaron como interruptores dispositivos MOSFET, el interruptor seleccionado como principal para la rectificación síncrona es el MOSFET “IRF530”, mientras que para la rectificación asíncrona se eligió el diodo “RB088BM100”, en la Tabla 3.8 se muestran las características eléctricas de los modelos de los interruptores, los cuales se seleccionaron de acuerdo con los parámetros calculados en la Tabla 3.7.

Es importante recalcar que para tener simetría en cuanto a elementos parásitos (resistencias y capacitancias) en el diseño del circuito impreso (PCB) ambos interruptores deben ser del mismo modelo seleccionado. (Santos, 2016)

Tabla 3.8. Características de los interruptores	
DIODO RB088BM100	MOSFET IRF530
Reverse Voltaje (VR) = 100 V	Drain-Sources Voltage (VDS) = 100 V
Average rectified foward current (Io) = 10A	Static Drain-Sources (RDS) = 0.16 ohm
Foward Voltage (VF) = 0.74 V	Drain Current (ID) = 14 A
	Gate-Sources Voltage (VGS) = ± 20
	Input Capacitance (CISS) 670pF

3.2 Implementación de pulsos de disparo

En el caso de los convertidores conmutados, las señales que realizan las conmutaciones de los interruptores son importantes, dado que de ello depende la apertura y cierre de cada interruptor. Existen diversas formas para generar pulsos de disparo del convertidor, desde dispositivos microcontroladores, circuitos integrados, PLD's y FPGA's. En el caso de este trabajo se seleccionó una tarjeta FPGA SPARTAN A3 de XILINX.

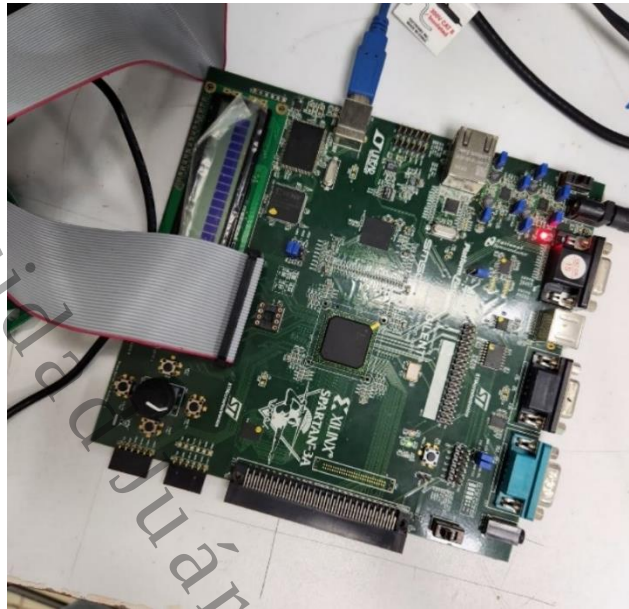
FPGA SPARTAN-3A

Para la programación de este dispositivo se utilizó el software "Project Navigator" de XILINX, el cual cuenta con un apartado para programación por medio de bloques. En la Figura 3.1 se muestra la placa para pruebas FPGA.

Características generales del FPGA

- Un reloj de 50 MHz con un periodo de 20 ns.
- Programación FPGA por medio de USB.
- Convertidor Digital-Analógico.
- FAMILY: XILINX SPARTAN-3A.
- DEVICE: XCS3700A.
- SPEED: - 4.

Figura 3.1. Tarjeta de pruebas FPGA-3A



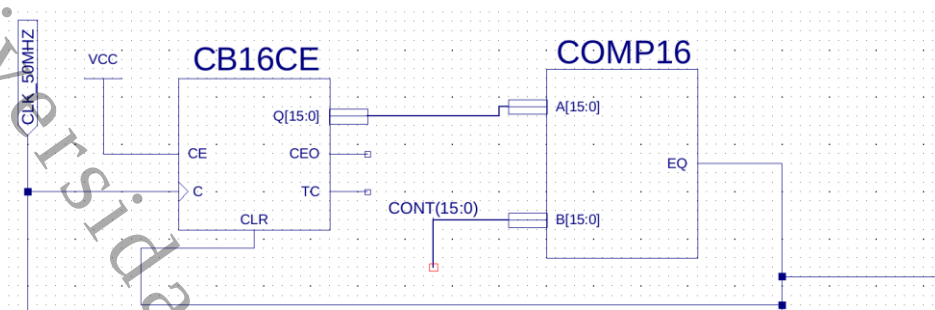
Estructura de programación

En este apartado, se presenta la programación de los pulsos de disparo para las conmutaciones de los interruptores en el convertidor Buck multifase dos fases. Cabe mencionar que solo es necesario la generación de los pulsos de disparo de esta topología debido a que esta programación puede ser utilizada para los demás casos a analizar, solo deshabilitando los pulsos de disparo correspondientes.

Generación de frecuencia

El reloj del FPGA tiene una frecuencia 50 MHz, teniendo un periodo (pulsos) de 20 ns, por lo cual se realizó un arreglo principal, para generar la frecuencia requerida del convertidor de 150 kHz con periodo de 6.6 μ s. Se seleccionó un contador de 16 bits (CB16CE) que cuenta máximo hasta 330, el cual se limita con un comparador (COMP16), la señal comparada de salida reinicia el contador principal. La estructura para generar el pulso de reloj a la frecuencia deseada se observa en la Figura 3.2.

Figura 3.2. Generador de pulso de reloj



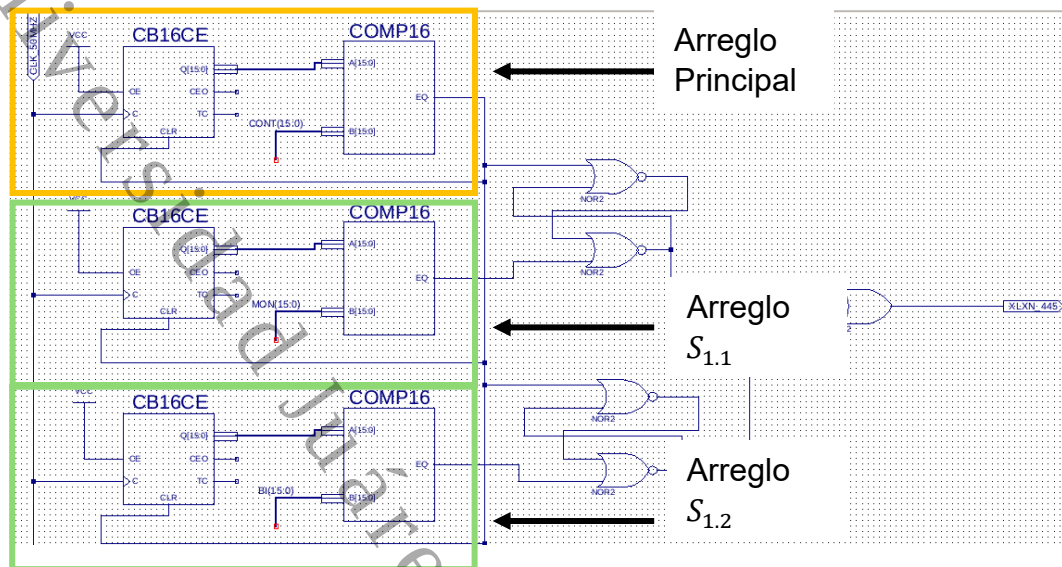
Pulsos de disparo

Para la generación de pulsos de cada interruptor se realizó una configuración que consiste en un contador de 16 bits y un comparador, las cuentas del comparador dependen del tiempo del estado alto y bajo de los pulsos de disparo. Cada contador se reinicia una vez completadas las 330 cuentas del arreglo principal. A todos los arreglos se les añadió un Latch, en el cual están conectados el generador de pulso de reloj y al arreglo correspondiente, esta configuración permite generar los pulsos que controlan el encendido y apagado de cada interruptor. Cabe mencionar que para evitar traslapes se considera un tiempo muerto entre pulsos de $20 \times 10^{-9} \text{ s}$, esto evita agregar circuitos adicionales en el diseño de la tarjeta del convertidor

Pulso superior S_1

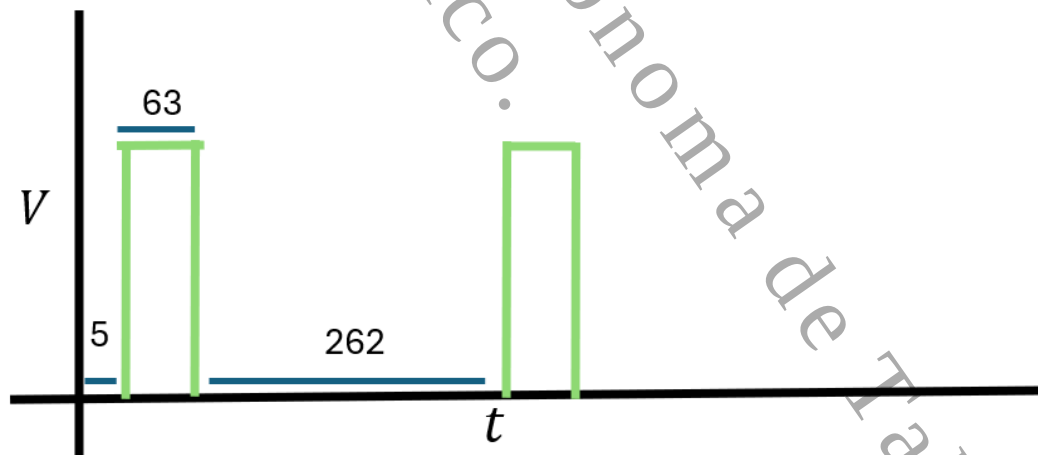
En el caso del primer interruptor, se realizaron dos arreglos, en el primer arreglo ($S_{1.1}$) el comparador es colocado con 68 cuentas, donde empieza en estado alto para posterior a dichas cuentas pase a estado bajo. En el segundo arreglo ($S_{1.2}$) el comparador es colocado con 5 cuentas, donde empezará en estado alto para posterior pase a estado bajo. Subsiguiente a la generación de ambos pulsos se añade una compuerta lógica XOR, en la cual estarán conectados las dos estructuras, dando como resultado que el pulso inicie en estado bajo durante 5 cuentas, se mantenga en estado alto durante 63 cuentas y por último permanezca en estado bajo hasta el reinicio del contador principal. La configuración del interruptor S_1 se muestra en la Figura 3.3.

Figura 3.3. Pulso de disparo del interruptor superior S_1



En la Figura 3.4 se muestra la gráfica de los pulsos de disparo del interruptor superior S_1 , donde se observan las cuentas en las que el pulso se encuentra en estado bajo y alto respectivamente, además del reinicio de las cuentas.

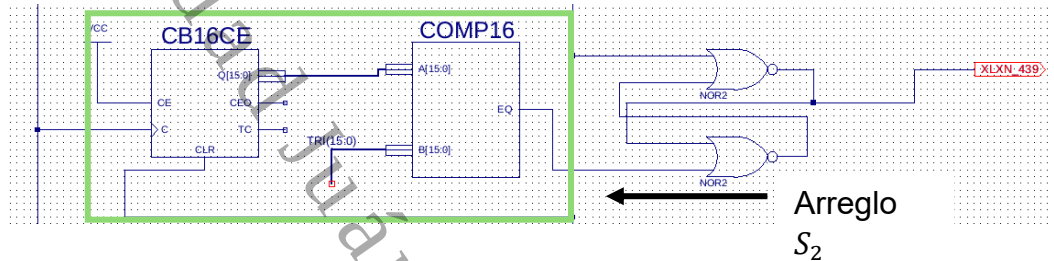
Figura 3.4. Gráfica de pulso del interruptor S_1



Pulso inferior S_2

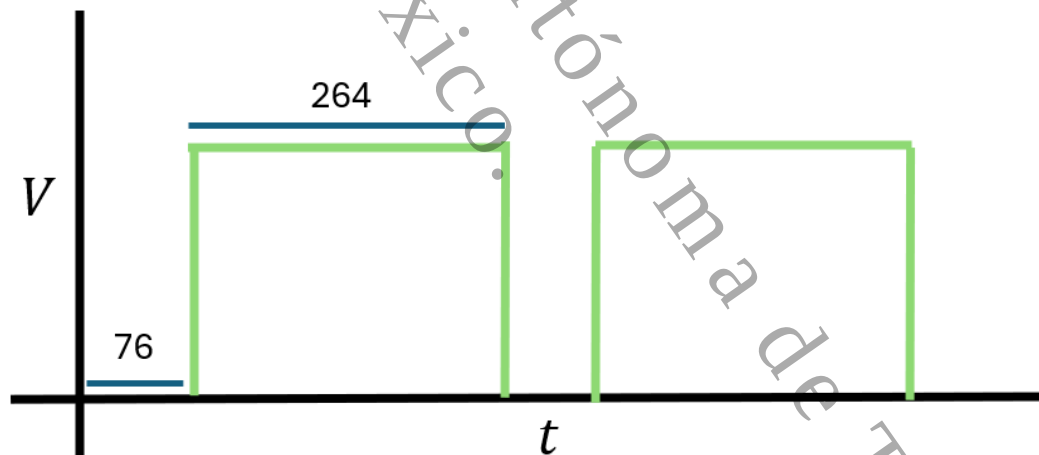
Para la generación de este pulso el comparador (S_2) se coloca en 76 cuentas, de esta manera el pulso permanece estado bajo durante dichas cuentas y posteriormente permanecerá en alto hasta que se reinicie el contador del arreglo principal. Tal y como se muestra en la Figura 3.5.

Figura 3.5. Pulso de disparo del interruptor inferior S_2



En la Figura 3.6 se muestra la gráfica de los pulsos de disparo del interruptor inferior S_2 , donde se observan las cuentas en las que el pulso se encuentra en estado bajo y alto respectivamente.

Figura 3.6. Gráfica de pulso del interruptor S_2

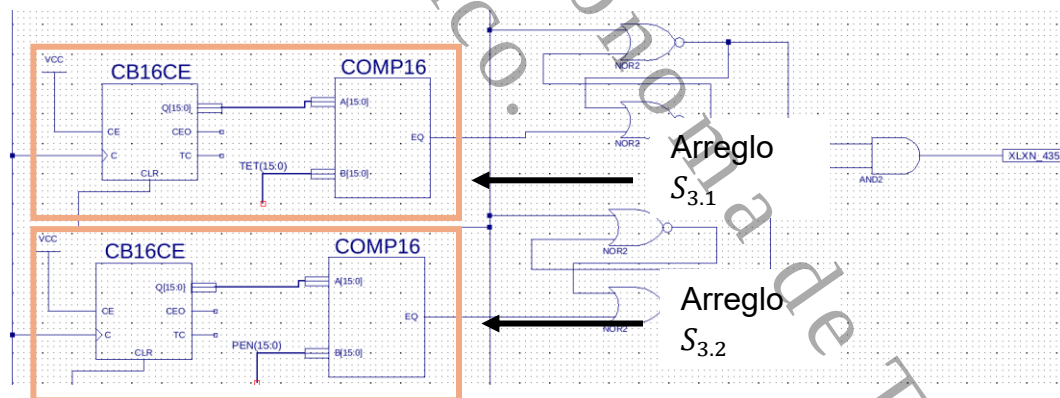


Pulso superior S_3

Para el caso del tercer y cuarto pulso de los interruptores, estos corresponden a la segunda fase del convertidor Buck multifase, por cual estos deberán estar desfasados 180° de los pulsos de la primera fase es decir tener un retardo de $3.3 \mu S$

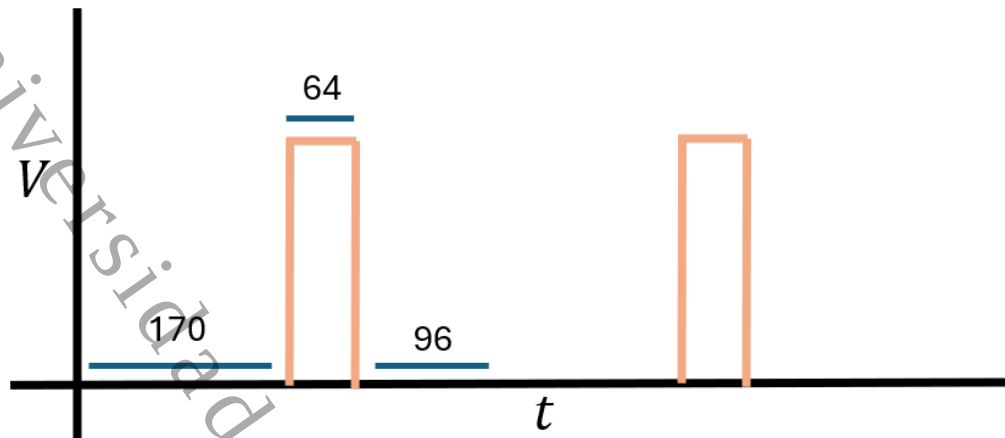
En la Figura 3.7 se muestra la configuración para los pulsos de disparo del interruptor S_3 , donde se colocaron dos arreglos, el comparador del primer arreglo ($S_{3.1}$) es colocado con 170 cuentas, donde empezara en estado bajo y posterior a las cuentas este se mantendrá en estado alto, mientras que el segundo comparador correspondiente al arreglo dos ($S_{3.2}$) es colocado con 234 cuentas, en el cual comenzara en estado alto para posterior a las cuentas pasar a estado bajo. Subsiguiente a la generación de los pulsos se añade una compuerta lógica AND, donde estarán conectados ambos pulsos, con esta configuración el pulso inicia en estado bajo durante 170 cuentas, posteriormente pasa a estado alto durante 64 cuentas y finalmente se mantiene en estado bajo hasta el reinicio del contador principal.

Figura 3.7. Pulso de disparo del interruptor inferior S_3



En la Figura 3.8 se muestra la gráfica de los pulsos de disparo del interruptor superior S_3 , donde se observan las cuentas en las que el pulso se encuentra en estado bajo y alto respectivamente, además del reinicio de las cuentas.

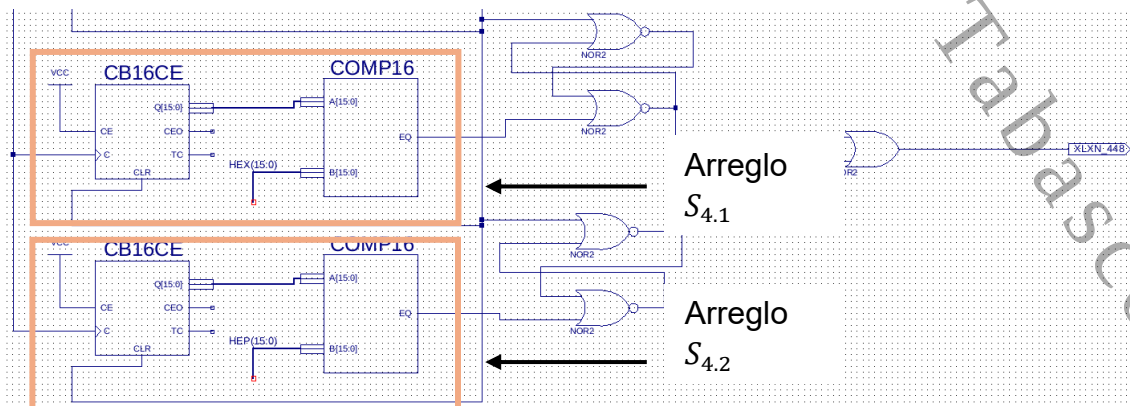
Figura 3.8. Gráfica de pulso del interruptor S_3



Pulso inferior S_4

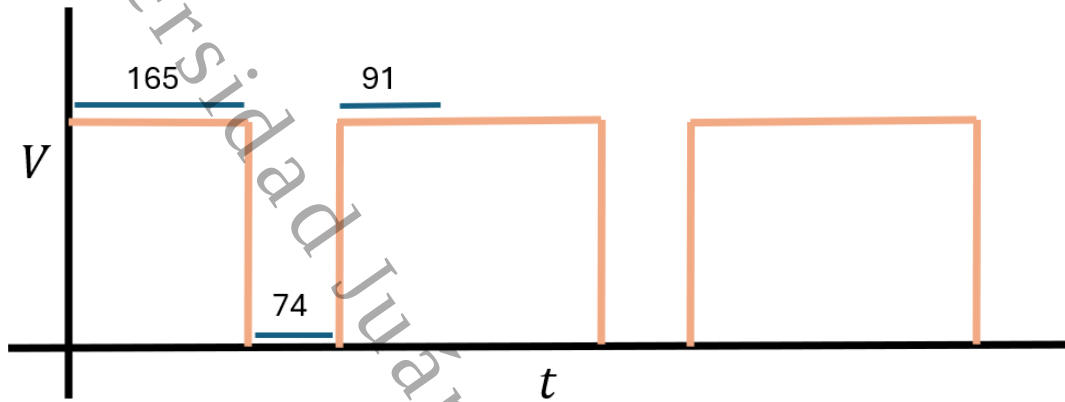
Por último, para el cuarto pulso se colocaron dos arreglos, el comparador del primer arreglo ($S_{4.1}$) es colocado con 165 cuentas, donde empezara en estado alto y posterior a las cuentas este se mantendrá en estado bajo, mientras que el segundo comparador correspondiente al arreglo dos ($S_{4.2}$) es colocado con 239 cuentas, en el cual comenzara en estado bajo para posterior a las cuentas pasar a estado alto. Subsiguiente a la generación de los pulsos se añade una compuerta lógica OR, donde estarán conectados ambas estructuras de disparo, con esta configuración el pulso inicia en estado alto durante 165 cuentas, posteriormente pasa a estado bajo durante 74 cuentas y finalmente se mantiene en estado alto hasta el reinicio del contador principal. La Figura 3.9 ilustra la estructura de disparo para el interruptor S_4 .

Figura 3.9. Pulso de disparo del interruptor inferior S_4



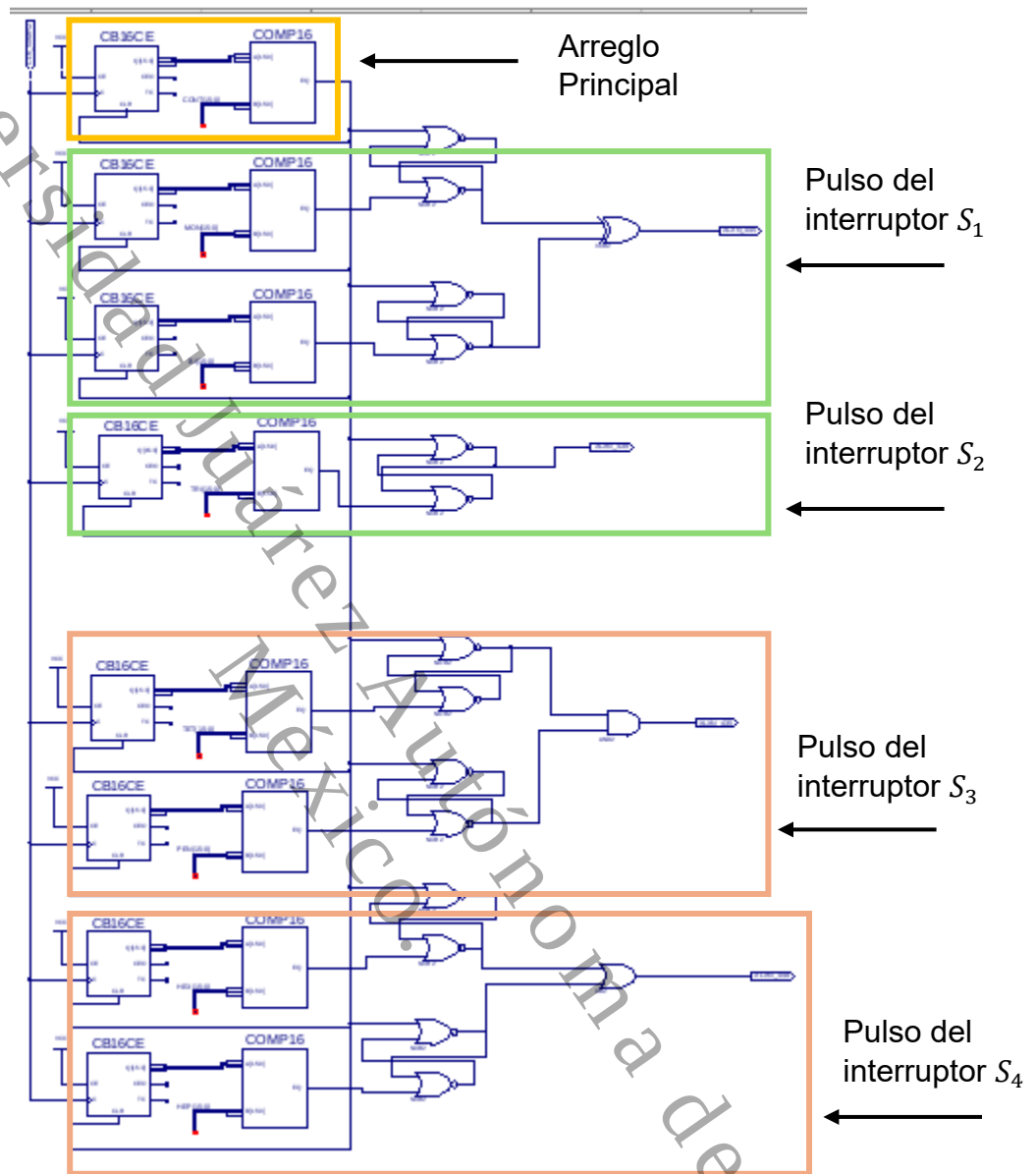
En la Figura 3.10 se muestra la gráfica de los pulsos de disparo del interruptor inferior S_4 , donde se observan las cuentas en las que el pulso se encuentra en estado bajo y alto respectivamente, además del reinicio de las cuentas.

Figura 3.10. Gráfica de pulso del interruptor S_4



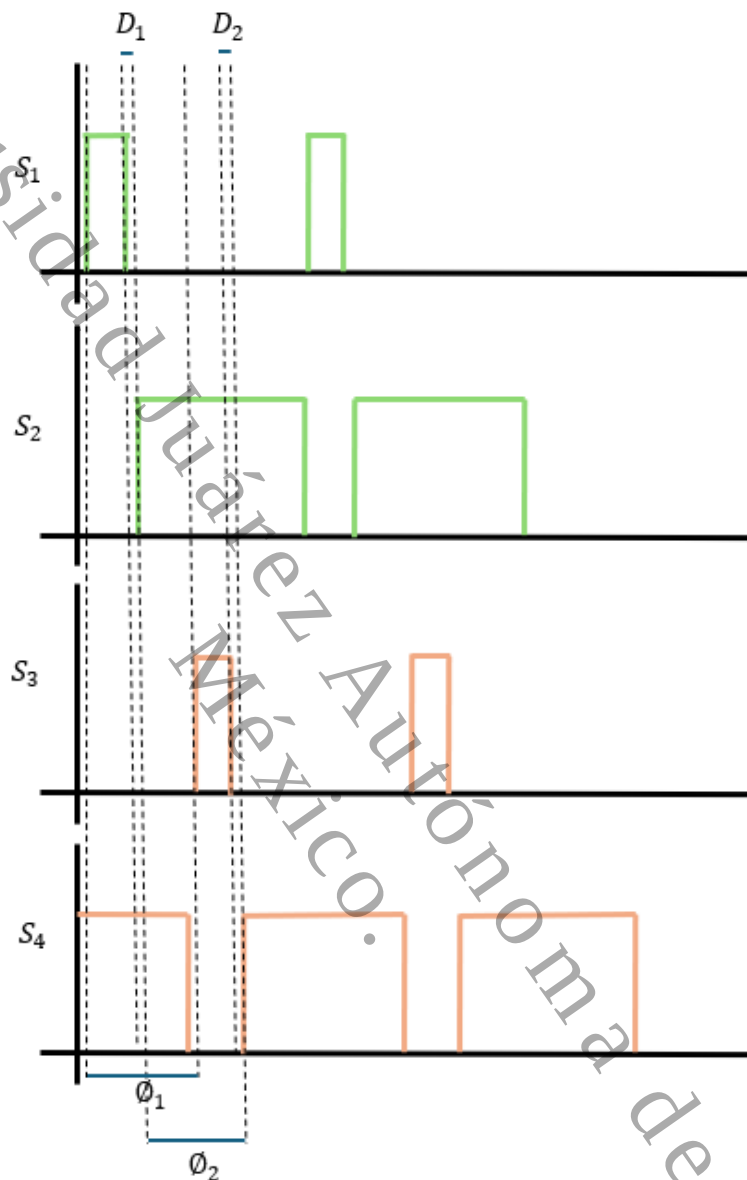
En la Figura 3.11 se muestra la programación de los cuatro pulsos de disparo para cada interruptor.

Figura 3.11. Pulso de disparo de los interruptores para un convertidor Buck multifase dos fases



En la Figura 3.12 se ilustran las gráficas de los disparos de los cuatro interruptores, donde se observa que se consideran tiempos muertos entre pulsos en ambas fases del convertidor para evitar traslapes (D_1 y D_2), además se muestran los desfases de los interruptores superiores e inferiores respectivamente representados como ϕ_1 y ϕ_2 .

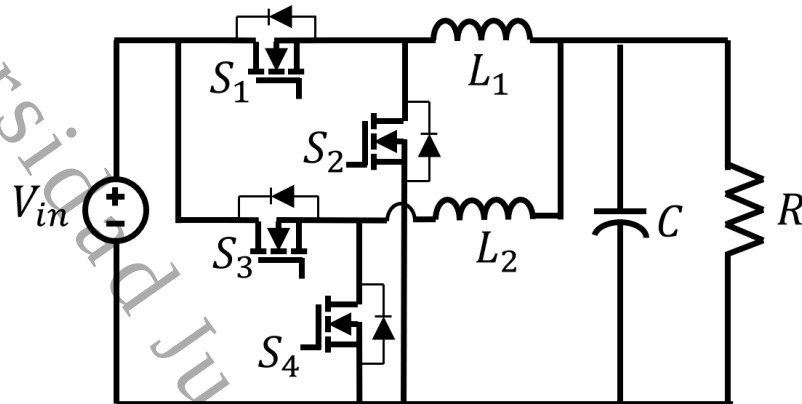
Figura 3.12. Pulso de disparo de los interruptores



Cada pulso de disparo se conecta a la compuerta de cada interruptor de acuerdo con el diagrama que se muestra en la Figura 3.13. Dependiendo de la topología del convertidor Buck que se desee analizar son los interruptores que se habilitan, es decir, en el caso monofase asíncrono, solo se habilita el interruptor S_1 , para el caso monofase síncrono, se habilitan los pulsos de los interruptores S_1 y S_2 , permitiendo únicamente la conducción de corriente en una sola fase, mientras que

para el caso multifase asíncrono se habilitan los interruptores S_1 y S_3 , finalmente para el caso multifase asíncrono se habilitan todos los interruptores.

Figura 3.13. Diagrama eléctrico del convertidor Buck multifase



En la Tabla 3.9 se muestran la habilitación de los pulsos de disparo para cada interruptor de acuerdo con su topología correspondiente.

Tabla 3.9. Habilitación de pulsos por topología				
Topología/Pulsos	S1	S2	S3	S4
Monofase Asíncrona	X			
Monofase Síncrona	X	X		
Multifase Asíncrona	X		X	
Multifase Síncrona	X	X	X	X

3.3 Desarrollo de Placa de circuito impreso (PCB)

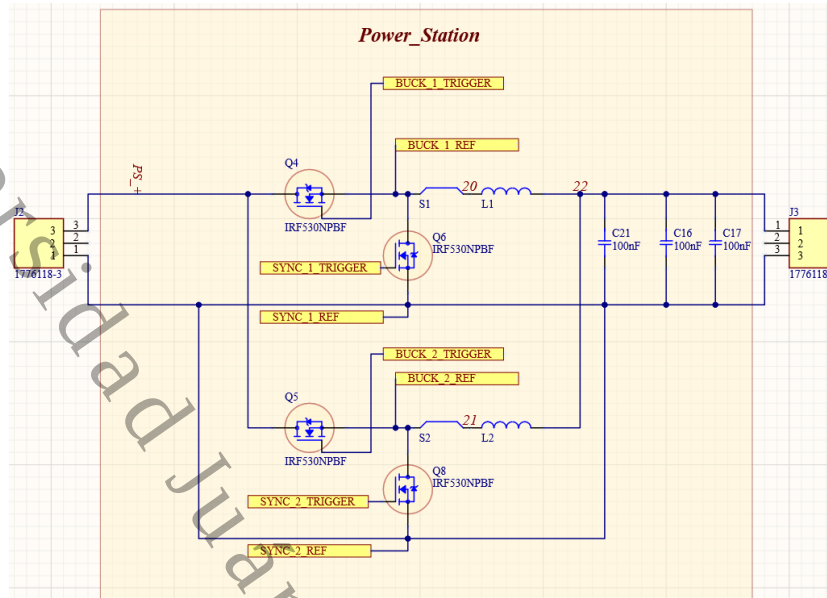
Una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés, "Printed Circuit Board") es un dispositivo de electrónica, que combina componentes y conexiones eléctricas dentro de una estructura mecánica. La estructura incorpora elementos conductores como trazas de cobre, terminales y disipadores de calor, todo encapsulado en capas de material dieléctricos. Durante la fabricación, se constituye de capas de cobre y aislante, se graban trazas de cobre específicas para conectar los componentes del circuito. Finalmente, la PCB se recubre con una capa de máscara de soldadura y se imprime para identificar los componentes (Zachirah Peterson, 2023).

Para el desarrollo del PCB se utilizó el software Altium Designer. A continuación, se muestra el proceso de elaboración del PCB.

Diseño del convertidor en Altium Designer

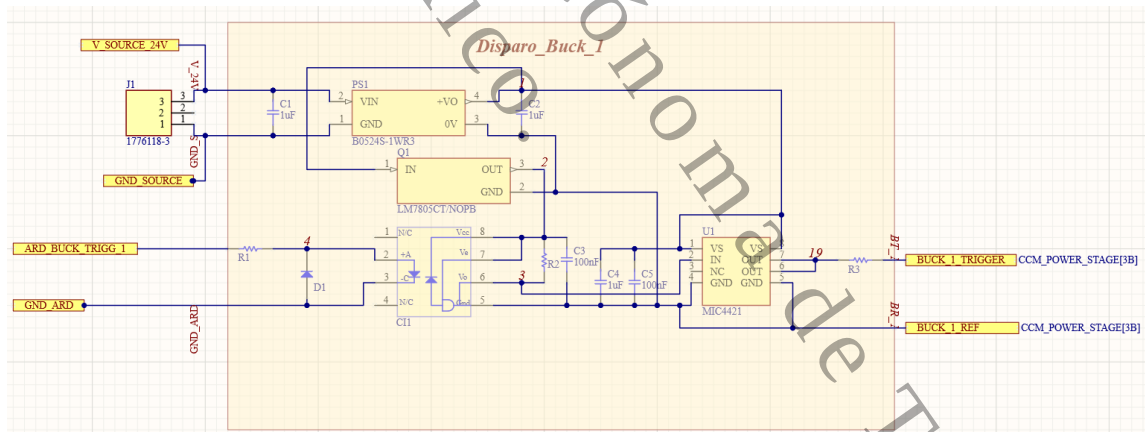
En la implementación física se realizó una placa PCB del convertidor Buck multifase, el diagrama eléctrico de las conexiones para la etapa de potencia del convertidor Buck multifase, se muestra en la Figura 3.14.

Figura 3.14. Diagrama eléctrico del convertidor Buck multifase etapa de potencia



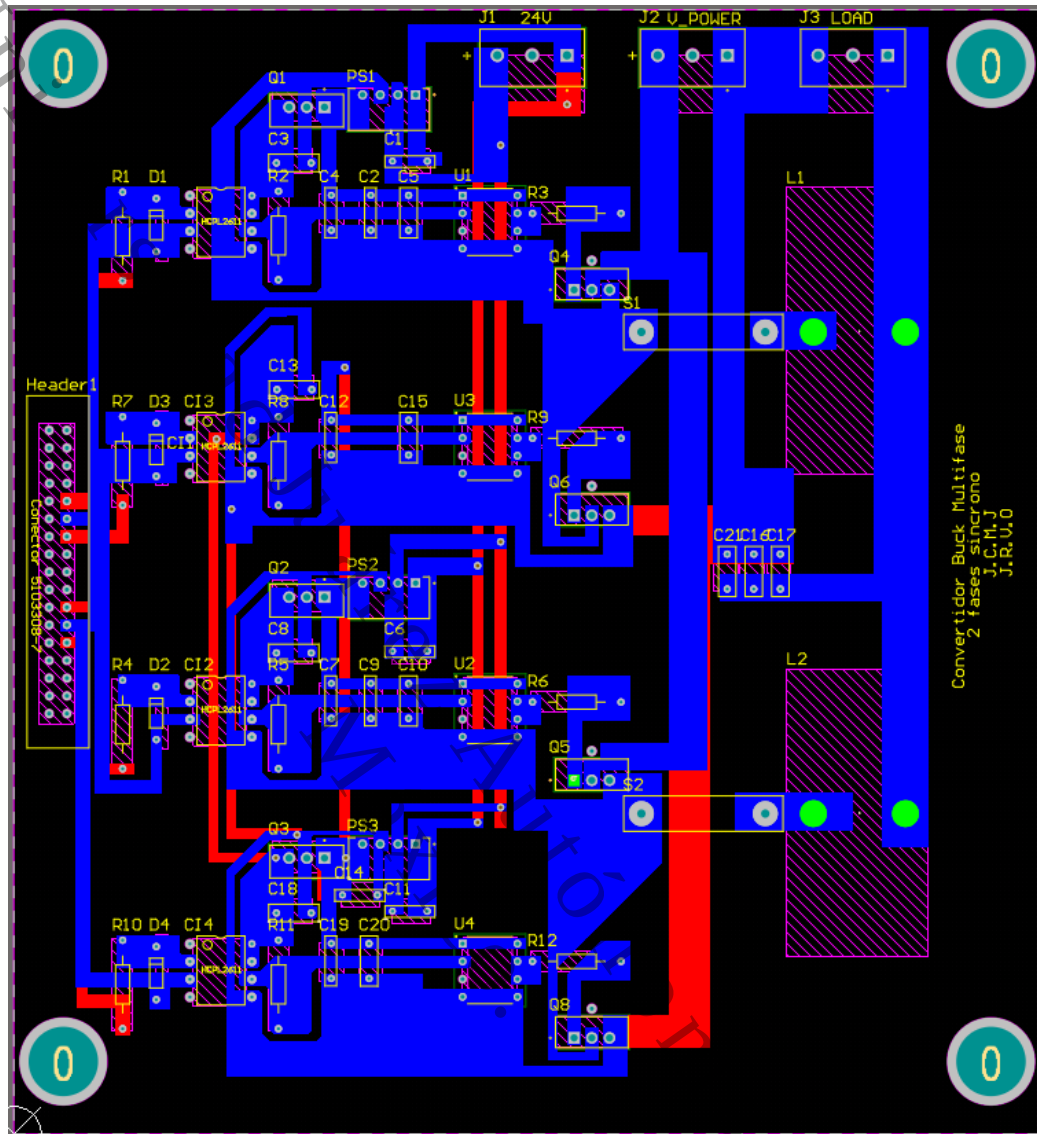
En la Figura 3.15 se muestra la etapa de disparo de los interruptores, dado que el FPGA proporciona señales de voltaje de 3 V se requiere adecuar los pulsos, por lo que se colocó un driver y un optoacoplador.

Figura 3.15. Etapa de pulsos de disparo



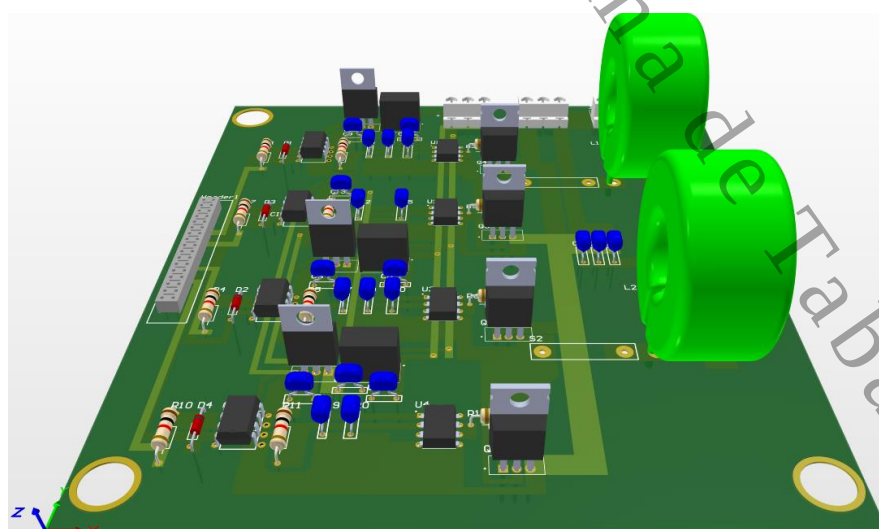
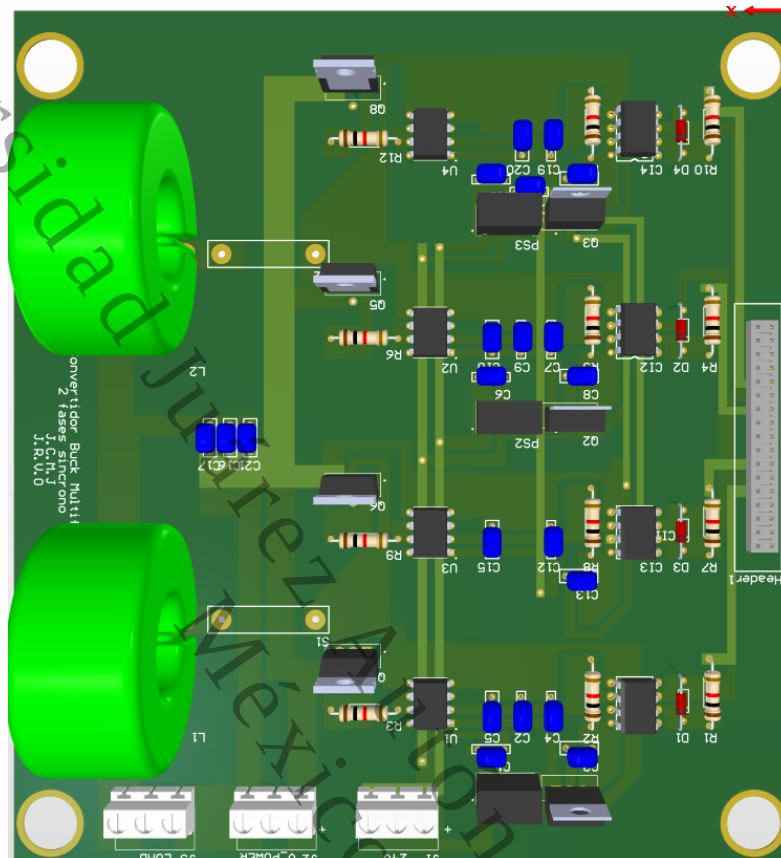
En la Figura 3.16 se observa el diagrama eléctrico de la placa PCB, donde las pistas se encuentran por ambas caras de la placa, donde las líneas azules representan las pistas en la cara inferior, mientras que las líneas rojas representan las pistas de la cara superior.

Figura 3.16. Diagrama de placa en el software Altium Designer



En la Figura 3.17 se muestran imágenes sobre el diseño 3D del convertidor Buck desde dos vistas diferentes siendo la Figura 3.17 (a) una imagen con vista aérea y la Figura 3.17 b) una imagen de la vista de un costado.

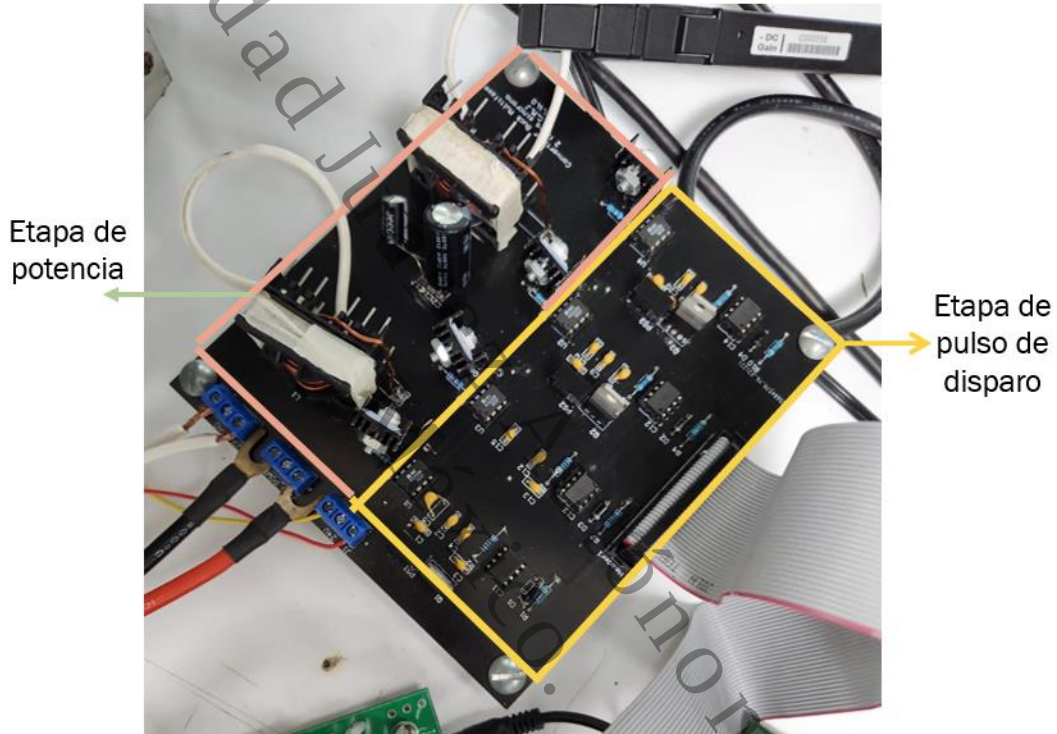
Figura 3.17. Diagrama 3D del convertidor Buck multifase (a) vista aérea (b) vista de costado

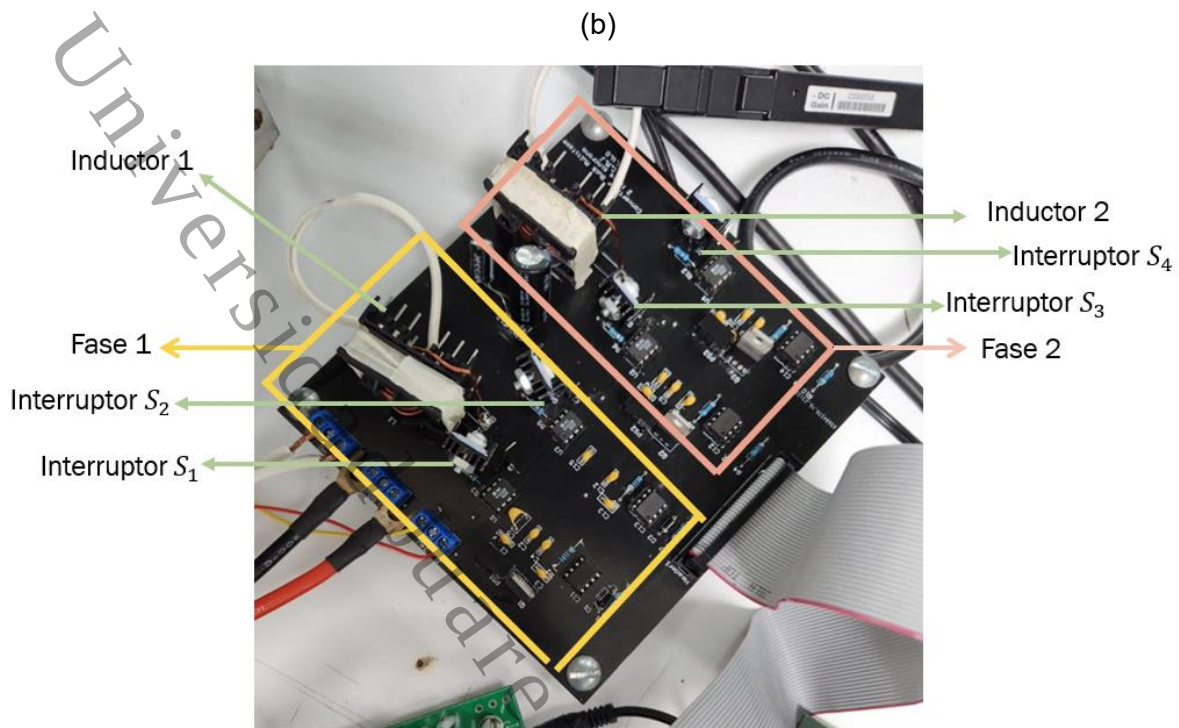


En la Figura 3.18 (a) se presenta la placa PCB, en la que realizaron las pruebas de los cuatro casos del convertidor Buck, se ilustran las etapas de pulso de disparo y potencia respectivamente, en la Figura 3.18 (b) se muestran las secciones de fases del convertidor, así como los inductores por fases y los interruptores.

Figura 3.18. (a) Placa PCB del convertidor Buck multifase (b) Etapas del convertidor

(a)



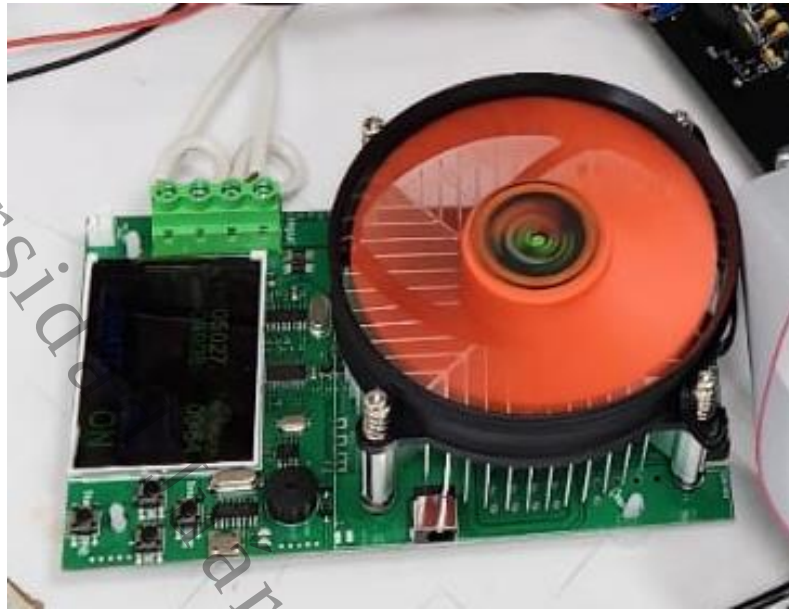


Carga electrónica

Para el sistema de pruebas se seleccionó una carga electrónica DL24 ATORCH se muestra en la Figura 3.19, la carga tiene cuatro modos de operación, donde puede mantener constantes sus valores de voltaje, corriente, resistencia y potencia. En la Tabla 3.10 se muestran las características de la carga

Tabla 3.10. Características de la carga	
características	Descripción
Protección de sobre corriente	> 21 A
Protección de sobre calentamiento	> 100 °C
Protección de sobre carga	> 185 W

Figura 3.19. Carga electrónica DL24 ATORCH



En la Figura 3.20 se presenta el sistema de prueba, donde se observa la generación de los pulsos por parte del FPGA, la placa PCB del convertidor Buck multifase y la carga electrónica.

Figura 3.20. Sistema de prueba para convertidor Buck

Convertidor Buck multifase
(dos fases)



CAPÍTULO 4

4. Resultados

4.1 Análisis teórico de pérdidas de potencia

Para esta sección se usaron como referencia las guías de los fabricantes “Fairchild semiconductor” y “Rhom Semiconductor”, en los cuales se realiza el análisis eficiencia de los convertidores Buck y las pérdidas en los interruptores MOSFET.

Las principales causas de las pérdidas de potencia son:

- Conducción en el MOSFET.
- Conmutación en el MOSFET.
- Tiempo de recuperación del diodo.
- Capacitancia del MOSFET.
- Los tiempos muertos.
- Operación en los CI.
- Capacitor del convertidor.
- Inductor del convertidor.

Para esta sección se analizaron los cuatro caso del convertidor Buck mencionados anteriormente, donde el enfoque de las pérdidas está enfocado en los interruptores del convertidor, debido que al ser un convertidor de baja potencia la mayor cantidad de pérdidas se presenta en los elementos semiconductores.

Valores RMS del convertidor Buck

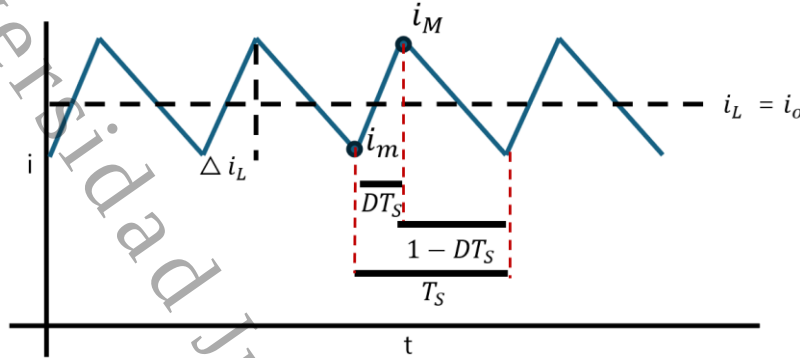
Para conocer la corriente RMS en cualquier convertidor se toma como referencia la corriente del inductor.

Rectificación asíncrona

En la Figura 4.1 se muestra la gráfica de corriente del inductor en un convertidor, el interruptor superior conduce durante el tiempo de DT_s y el interruptor inferior (diodo) conduce durante el tiempo complementario $1 - DT_s$, además se

muestran el incremento de la corriente Δi_L , corriente máxima " i_M " y corriente mínima " i_m ".

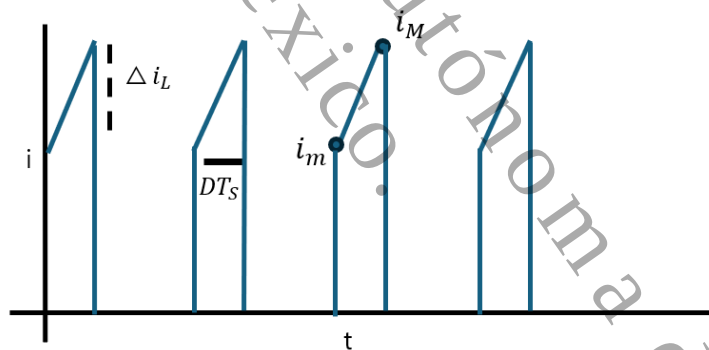
Figura 4.1. Gráfica de corriente del inductor del convertidor Buck



Interruptor S_1 (superior)

En la Figura 4.2 se ilustra la gráfica del comportamiento de la corriente en el interruptor superior S_1

Figura 4.2. Gráfica de corriente del interruptor S_1



Para obtener la ecuación de la corriente durante el tiempo de encendido del interruptor S_1 , se utiliza (4.1) sustituyendo los valores que se muestran en la Figura 4.2, se obtiene (4.3).

$$y = mx + b \quad (4.1)$$

$$i_{L1}(t) = mt + i_m ; m = \frac{\Delta i_L}{DT_s} \quad (4.2)$$

$$i_{L1}(t) = \frac{\Delta i_L}{DT_s} t + i_m \quad (4.3)$$

En (4.4) se muestra la fórmula de valor eficaz, donde se sustituye la ecuación de la recta obtenida, calculando la integral definida para estos valores se obtiene (4.6).

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_s} \int_0^{T_s} f(t)^2 dt} \quad (4.4)$$

$$i_{L1}(t) \rightarrow i_{S1} rms^2 = \frac{1}{DT_s} \int_0^{DT_s} \left(\frac{\Delta i_L}{DT_s} t + i_m \right)^2 dt \quad (4.5)$$

$$i_{S1} rms^2 = D \left(\frac{\Delta i_L^2}{3} + \Delta i_L i_m + i_m^2 \right) ; i_m = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (4.6)$$

En (4.7) se muestra la factorización de la corriente rms para el interruptor superior S_1 .

$$i_{S1} rms = \sqrt{D \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)} \quad (4.7)$$

Interruptor diodo (inferior)

En el caso de la rectificación por diodo el análisis es similar al del interruptor superior con la excepción que corresponde al tiempo complementario $1 - DT_s$, en la figura 4.3 se observa la gráfica de corriente para el diodo.

Figura 4.3. Gráfica de corriente del interruptor diodo

La figura muestra una gráfica de corriente i versus tiempo t . El eje horizontal t tiene una marca para $1 - DT_s$, que indica la duración del tiempo complementario. El eje vertical i muestra los niveles de corriente i_M (punto de partida de la rampa) y i_m (punto de llegada de la rampa). El cambio de corriente en la rampa está etiquetado como Δi_L . La corriente es cero durante el tiempo DT_s . El área bajo la rampa está sombreada.

$$frms = \sqrt{\frac{1}{t_s} \int_0^{T_s} f(t)^2 dt} \quad (4.4)$$

$$iL_1(t) \rightarrow iS_1 rms^2 = \frac{1}{DT_s} \int_0^{DT_s} \left(\frac{\Delta i_L}{DT_s} t + i_m \right)^2 dt \quad (4.5)$$

$$i_{S1rms}^2 = D \left(\frac{\Delta i_L^2}{3} + \Delta i_L i_m + i_m^2 \right) \quad ; i_m = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (4.6)$$

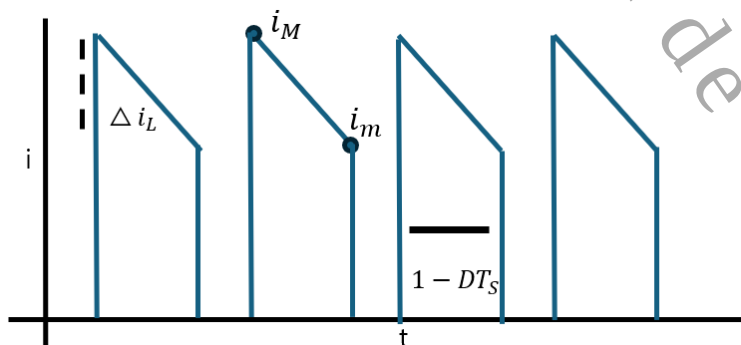
En (4.7) se muestra la factorización de la corriente rms para el interruptor superior S_1 .

$$iS_{1rms} = \sqrt{D \left(i\omega^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)} \quad (4.7)$$

Interruptor diodo (inferior)

En el caso de la rectificación por diodo el análisis es similar al del interruptor superior con la excepción que corresponde al tiempo complementario $1 - DT_S$, en la Figura 4.3 se observa la gráfica de corriente para el diodo.

Figura 4.3. Gráfica de corriente del interruptor diodo



En (4.8) se muestra la corriente rms para el diodo.

$$i_{Drms} = \sqrt{(1-D) \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_l^2}{12} \right)} \quad (4.8)$$

Rectificación síncrona

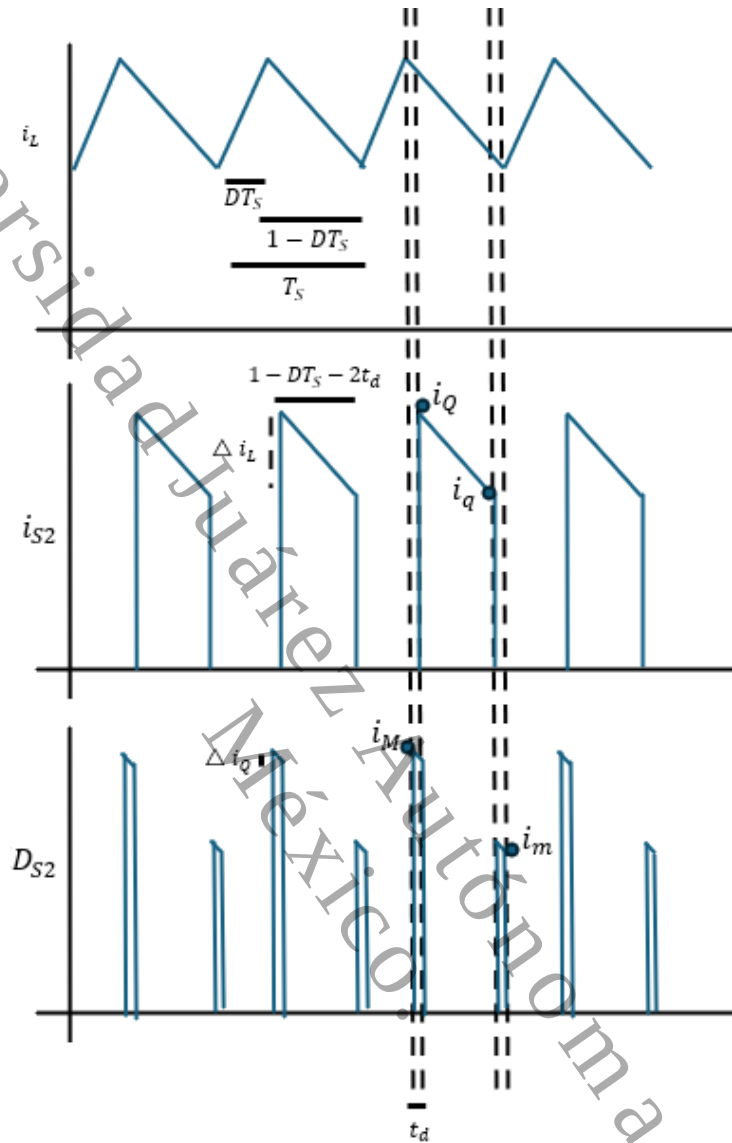
Interruptor S_1 (superior)

Para el interruptor superior en la rectificación síncrona se considera el mismo análisis que en la rectificación asíncrona, de esta manera se utiliza (7) para la corriente rms del interruptor S_1

Interruptor S_2 (inferior)

En el caso del interruptor inferior (S_2), se consideran los tiempos muertos que existen entre interruptores para evitar traslapes entre pulsos, es decir que tanto el interruptor S_1 como el interruptor S_2 se encuentran estado off, por lo cual durante estos tiempos la corriente se conduce a través del diodo parásito del interruptor inferior $i_{D_{s2}}$, debido a esto el interruptor conducirá a partir de la corriente máxima i_Q hasta corriente mínima i_q que será el momento en el que se apaga el interruptor como se muestra en la Figura 4.4, donde se muestran las gráficas de corriente del inductor i_L , la corriente del interruptor S_2 y la corriente del diodo parásito del interruptor $i_{D_{s2}}$, de igual manera se muestra " t_d " siendo una proporción del ciclo de trabajo que representa los tiempos muertos

Figura 4.4. Gráfica de corriente del interruptor S_2 en rectificación síncrona



Se considera la ecuación de la recta, donde se sustituyen los valores con los parámetros de la corriente del inductor para el interruptor S_2 , tal como se muestra en (4.9).

$$i_{L_2}(t) = mt + iQ \quad ; m = \frac{\Delta iQ}{(1 - D - 2t_d)T_s} \quad (4.9)$$

$$i_{L_2}(t) = \frac{\Delta iQ}{(1 - D - 2t_d)T_s} t + iQ \quad (4.10)$$

Sustituyendo los valores de (4.10) en (4.4) se obtiene el cálculo de la corriente rms, que se muestra en (4.12) y (4.13).

$$i_{L_2}(t) \rightarrow i_{S_2}rms^2 = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D-2t_d)T_s} \left(-\frac{\Delta i Q}{(1-D-2t_d)T_s} t + iQ \right)^2 dt \quad (4.11)$$

$$i_{S_2}rms^2 = (1-D-2t_d) \left(\frac{\Delta i Q^2}{3} - \Delta i Q i Q + i Q^2 \right) \quad (4.12)$$

$$i_{S_2}rms = \sqrt{(1-D-2t_d) \left(\frac{\Delta i Q^2}{3} - \Delta i Q i Q + i Q^2 \right)} \quad (4.13)$$

Topología multifase

Para el caso de la topología multifase se utilizan las mismas ecuaciones que en la topología monofase, donde se consideran los valores de corriente máxima y corriente mínima que dependen del inductor de cada etapa.

En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de las ecuaciones para los interruptores de corriente rms para cada caso del convertidor Buck.

Tabla 4.1. Ecuaciones de corriente rms para el convertidor Buck			
Topología	Interruptor	Monofase	Multifase
Asíncrono	Superior	$i_{S1}rms = \sqrt{D \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$	$i_{S1}rms = \sqrt{D \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$
			$i_{S1}rms = \sqrt{D \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$
	Inferior	$i_Drms = \sqrt{(1-D) \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$	$i_{D1}rms = \sqrt{(1-D) \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$
			$i_{D2}rms = \sqrt{(1-D) \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$
Síncrono	Superior	$i_{S1}rms = \sqrt{D \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$	$i_{S1}rms = \sqrt{D \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$
			$i_{S1}rms = \sqrt{D \left(i_o^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right)}$
	Inferior	$i_{S2}rms = \sqrt{(1-D-2t_d) \left(\frac{\Delta i_Q^2}{3} - \Delta i_Q i_Q + i_Q^2 \right)}$	$i_{S2}rms = \sqrt{(1-D-2t_d) \left(\frac{\Delta i_Q^2}{3} - \Delta i_Q i_Q + i_Q^2 \right)}$
			$i_{S4}rms = \sqrt{(1-D-2t_d) \left(\frac{\Delta i_Q^2}{3} - \Delta i_Q i_Q + i_Q^2 \right)}$

Las pérdidas en los MOSFET es la suma de las pérdidas en la conducción P_{on} y las pérdidas en la conmutación P_{sw} como se muestra (4.14) (Klein Jon, 2014).

$$P_s = P_{on} + P_{sw} \quad (4.14)$$

Para el cálculo de las pérdidas de potencia, los parámetros a sustituir son tomados de los parámetros de diseño del convertidor que se muestran en la Tabla 2.1 y de las hojas de datos de los fabricantes, para el interruptor MOSFET IRF530 y el diodo RB088BM100 (By ALLDATASHEETCOM, 1998, 2021)

Convertidor monofase asíncrono

Pérdidas por conducción Interruptor superior S_1

Las pérdidas por conducción en el interruptor superior se calculan con la corriente rms, la resistencia del MOSFET y el ciclo de trabajo. En (4.15) y (4.16) se muestra el cálculo de las pérdidas por conducción en el interruptor superior.

$$P_{on-s1} = I_{s1}^{rms2} * R_{DS(on)} \quad (4.15)$$

$$P_{on-s1} = 2.6838^2 * 0.16 = \mathbf{1.152 \text{ W}} \quad (4.16)$$

Interruptor superior S_1 , conmutación

Las pérdidas por conmutación son calculadas cuando los interruptores superior e inferior cambian a estado encendido y apagado, una pérdida es generada durante la transición de conmutación, esta es aproximada utilizando (4.17), el resultado se muestra en (4.18) (Rohm CO & LTD, 2016).

$$P_{sw1} = \left(\frac{V_{in} * I_o}{2} \right) * F * (t_{s1(L-H)} + t_{s1(H-L)}) \quad (4.17)$$

$$P_{sw1} = \left(\frac{30 * 6}{2} \right) * 150 \times 10^3 * (9.38 \times 10^{-9} + 37.2124 \times 10^{-9}) = \mathbf{0.6290 \text{ W}} \quad (4.18)$$

En (4.19) se muestra las pérdidas de potencia en el interruptor S_1 , donde se suman las pérdidas por conducción y conmutación respectivamente.

$$P_{s1} = 1.152 + 0.629 = \mathbf{1.1781\ W} \quad (4.19)$$

Diodo

Las pérdidas por conducción en el diodo se calculan con la caída de voltaje en directa y corriente rms de acuerdo con (4.20), la sustitución de los valores se muestra en (4.21).

$$P_{on-D} = i_{Drms} * VF \quad (4.20)$$

$$P_{on-D} = 5.3676 * 0.87 = \mathbf{4.6698\ W} \quad (4.21)$$

Convertidor monofase Síncrono

interruptor superior S_1

Para este caso en el interruptor S_1 se considera el mismo cálculo presentado en (4.19), debido a que parten de los parámetros de diseño, siendo a así que la potencia del interruptor S_1 es de 1.1781 W.

interruptor inferior S_2 , conducción

En (4.22) se muestra el cálculo de la corriente rms para el interruptor S_2 . Cabe mencionar que se hace la consideración de los tiempos muertos " t_d " en proporción con el ciclo de trabajo que se observa en (4.23), donde se utilizan los parámetros del tiempo muerto (t_{dead}) y la frecuencia del convertidor.

$$i_{s2rms} = \sqrt{(1 - D - 2t_d) \left(\frac{\Delta i Q^2}{3} - \Delta i Q i Q + i Q^2 \right)} \quad (4.22)$$

$$t_d = (t_{dead} * f) \quad (4.23)$$

En (4.24) se muestra el cálculo para el incremento de corriente del interruptor S_2 .

$$\Delta i_Q = i_Q - i_q \quad (4.24)$$

En (4.25) se ilustra las pérdidas por conducción para el interruptor S_2 .

$$P_{on-s2} = 5.347426^2 * 0.16 = \mathbf{4.57519 \text{ W}} \quad (4.25)$$

interruptor inferior S_2 , conmutación

Las pérdidas por conmutación en el interruptor inferior son calculadas de manera similar a las pérdidas del interruptor superior con la (4.26). Cabe mencionar que los parámetros adicionales a los parámetros de diseño pueden obtenerse de la hoja de datos del componente seleccionado.

$$P_{sw2} = \left(t_{s2(H-L)} * V_F + t_{s2(L-H)} * \frac{V_F + i_o * 1.1 * R_{DS(on)}}{2} \right) * i_o * f \quad (4.26)$$

En (4.27) se muestra la potencia por conmutación del interruptor S_2 .

$$P_{sw2} = \left(3.2629 \times 10^{-9} * 0.6 + 28.613 \times 10^{-9} * \frac{0.6 + 6 * 1.1 * 0.16}{2} \right) * 6 * 150 \times 10^3 \\ = \mathbf{0.02308 \text{ W}} \quad (4.27)$$

En (4.28) se observan las pérdidas de potencia en el interruptor S_2 .

$$P_{s2} = 4.57519 + 0.02308 = \mathbf{4.5949 \text{ W}} \quad (4.28)$$

Convertidor multifase asíncrono

Interruptor superior S_1 y S_2 , conducción

Para el caso de los interruptores superiores en la topología multifase, se considera el mismo análisis que en la topología monofase, con la modificación del Δi_L , donde este dependerá individualmente del inductor de cada etapa. Es de mencionar que al tomar en cuenta los parámetros de diseño, la corriente del inductor será la misma en todas las etapas, por lo cual las pérdidas en ambos interruptores superiores serán las mismas, es decir (4.29).

$$P_{S1} = P_{S3} \quad (4.29)$$

En (4.30) se observa las pérdidas por conducción para los interruptores S_1 y S_2

$$P_{on-s1} = 1.3419^2 * 0.16 = \mathbf{0.2281 \text{ W}} \quad (4.30)$$

Interruptor superior S_1 y S_2 , conmutación

En (4.31) se presenta las pérdidas por conmutación para los interruptores superiores.

$$P_{sw1} = \left(\frac{30 * 3}{2} \right) * 150K * (9.048n + 43.307n) = \mathbf{0.7067 \text{ W}} \quad (4.31)$$

En (4.32) se muestran las pérdidas de potencia para los interruptores superiores.

$$P_{s1} = P_{s3} = 0.2281 + 0.7067 = \mathbf{0.9348 \text{ W}} \quad (4.32)$$

Diodo D_1 y D_2

se presenta las pérdidas de potencia en los interruptores inferiores (diodo) en (4.33).

$$P_{D1} = P_{D2} = 2.6854 * 0.87 = \mathbf{2.3336 \text{ W}} \quad (4.33)$$

Convertidor multifase Síncrono

Interruptor superior S_1 y S_3

Para este caso en los interruptores superiores se considera el mismo cálculo presentado en (4.32), debido a que parten de los parámetros de diseño, siendo así que la potencia del interruptor S_1 y S_3 es de 0.9948 W.

interruptor inferior S_2 y S_4 , conducción

Las pérdidas por conducción en los interruptores inferiores se presentan en (4.34).

$$P_{on-s2} = P_{on-s4} = 2.6737^2 * 0.16 = \mathbf{1.1438 \text{ W}} \quad (4.34)$$

interruptor inferior S_2 y S_4 conmutación

Las pérdidas por conmutación en los interruptores inferiores se presentan en (4.35).

$$P_{sw2} = P_{sw4} = \left(1.7364 \times 10^{-9} * 0.6 + 17.1943 \times 10^{-9} * \frac{0.6 + 3 * 1.1 * 0.16}{2} \right) * 3 * 150 \times 10^3 \\ = \mathbf{0.0048 \text{ W}} \quad (4.35)$$

En (4.36) se muestran las pérdidas de potencia en los interruptores inferiores.

$$P_{s2} = P_{s4} = 1.1438 + 0.0048 = \mathbf{1.1486 \text{ W}} \quad (4.36)$$

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen de las pérdidas de potencia generadas por cada interruptor en los cuatro casos del convertidor.

Tabla 4.2. Pérdidas Teóricas				
Párametros	Monofase asíncrono	Monofase síncrono	Multifase asíncrono	Multifase síncrono
Interruptor Superior (W)	1.1781	1.1781	0.9948	0.9948
			0.9948	0.9948
Interruptor Inferior (W)	4.6698	4.5949	2.3333	1.1486
			2.3333	1.1486
Pérdida total de los interruptores (W)	5.8479	5.773	6.6562	4.2868
Potencia de los convertidores - Pérdidas (W)	30.1521	30.227	29.3438	31.7132
Eficiencia (%)	83.75583333	83.96388889	81.51055556	88.09222222

Para conocer el comportamiento y correcto funcionamiento del convertidor se analizaron cuatro casos de estudio de configuraciones del convertidor Buck en modo de conducción continuo:

- Caso 1: Convertidor Buck monofase asíncrono en MCC.
- Caso 2: Convertidor Buck monofase síncrono en MCC.
- Caso 3: Convertidor Buck multifase asíncrono en MCC.
- Caso 4: Convertidor Buck multifase síncrono en MCC.

Para validar los resultados y compararlos se realizó la medición de: corriente de entrada, voltaje de entrada, corriente del inductor, corriente de salida, voltaje de salida, y se calculó la eficiencia del convertidor.

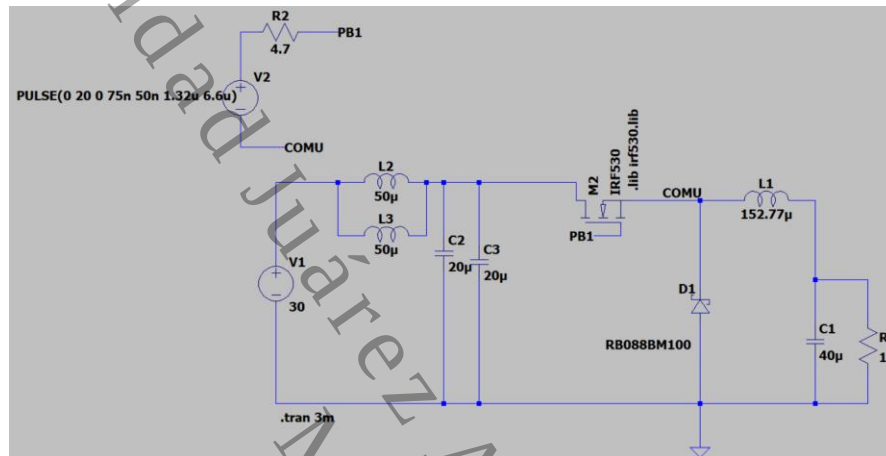
Cada caso fue analizado por medio de simulaciones en el software **Ltspice** y su posterior implementación física en una tarjeta de circuito impreso (PCB).

4.1. Simulaciones comparativas del convertidor Buck en MCC

Caso 1: Convertidor Buck monofase asíncrono en MCC

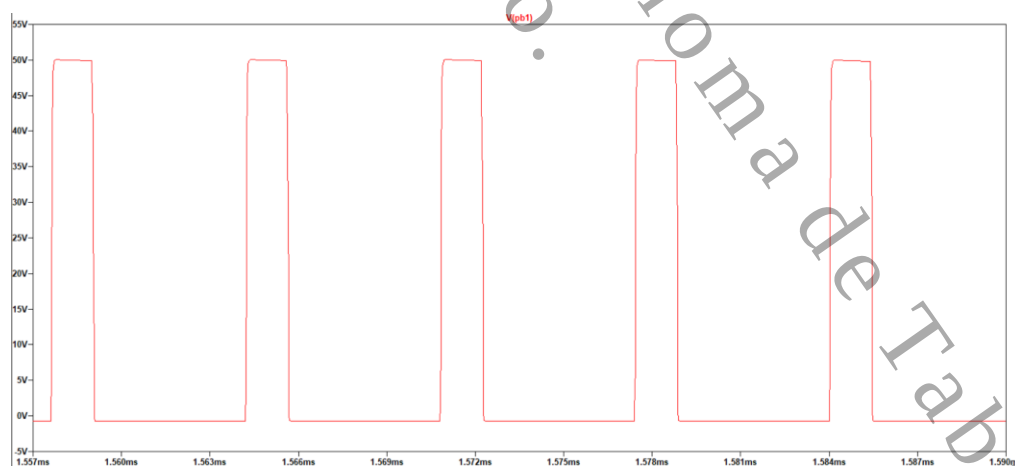
En la Figura 4.5 se muestra el diagrama del convertidor Buck con rectificación asíncrona conforme a los parámetros de diseño calculados.

Figura 4.5. Diagrama eléctrico del convertidor Buck Monofase con rectificación asíncrona



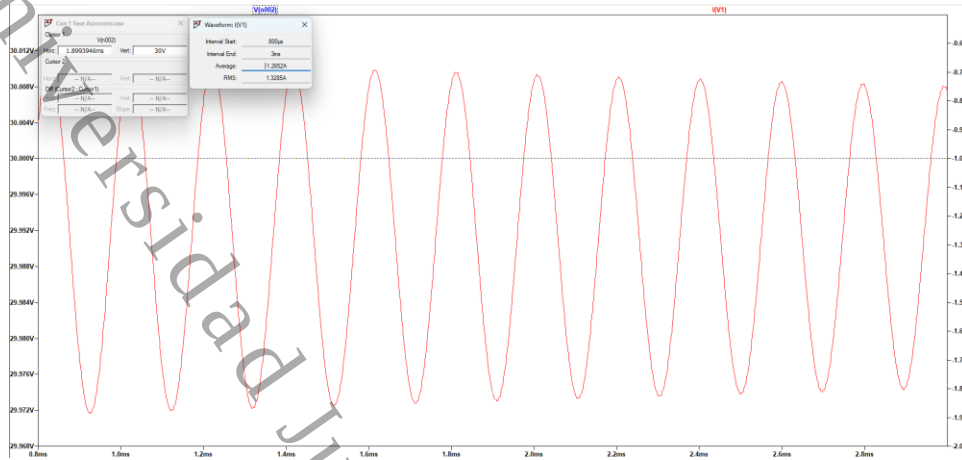
En la Figura 4.6 se muestra el pulso de disparo del interruptor superior del convertidor Buck mono fase.

Figura 4.6. Pulso de disparo del convertidor Buck monofase asíncrono



En la Figura 4.7 se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada del caso 1, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 1.265 A, mientras que el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.7. Señales de corriente y voltaje de entrada del Convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona



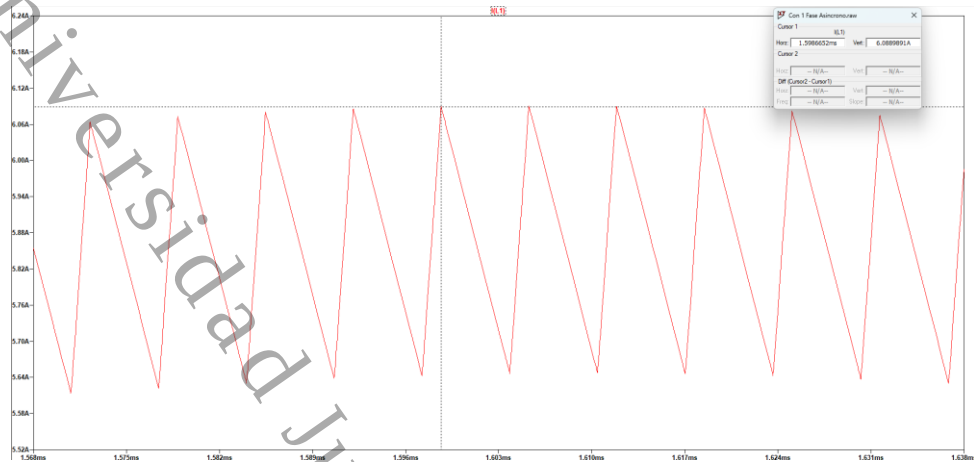
En (4.37) y (4.38) muestra el cálculo de potencia de entrada usando las mediciones de voltaje de entrada y corriente de entrada, donde la potencia es de 37.95 W.

$$P_{in} = V_{in} I_{in} \quad (4.37)$$

$$P_{in} = 30 \times 1.26 = 37.95 \text{ W} \quad (4.38)$$

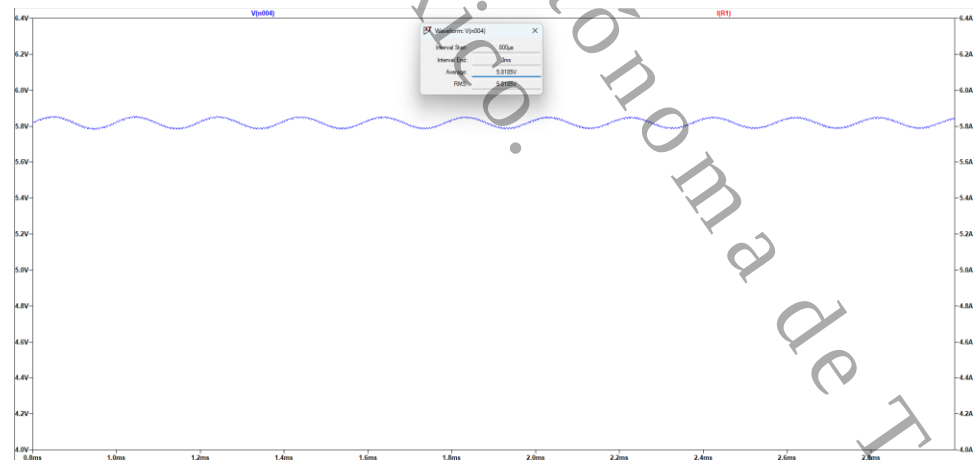
En la Figura 4.8 se observa el comportamiento de la corriente del inductor del convertidor monofase asíncrono, donde se muestra que el pico de corriente es de 6.08 A.

Figura 4.8. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona en MCC



En la Figura 4.9 se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida del caso 1, en donde se muestra que la corriente de salida es de 5.81 A, al igual que el voltaje de salida es de 5.81 V.

Figura 4.9. Señales de corriente y voltaje de salida del Convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona



En (4.39) y (4.40) muestra el cálculo de potencia de salida, por lo cual, usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida, donde la potencia de salida es de 33.75 W.

$$P_o = V_o I_o \quad (4.39)$$

$$P_o = 5.81 \times 5.81 = 33.75 \text{ W} \quad (4.40)$$

Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.41) y (4.42) se muestra el cálculo de la eficiencia del convertidor, para el caso 1 en la prueba a 30 V, se observa que la eficiencia es de 88.94 %.

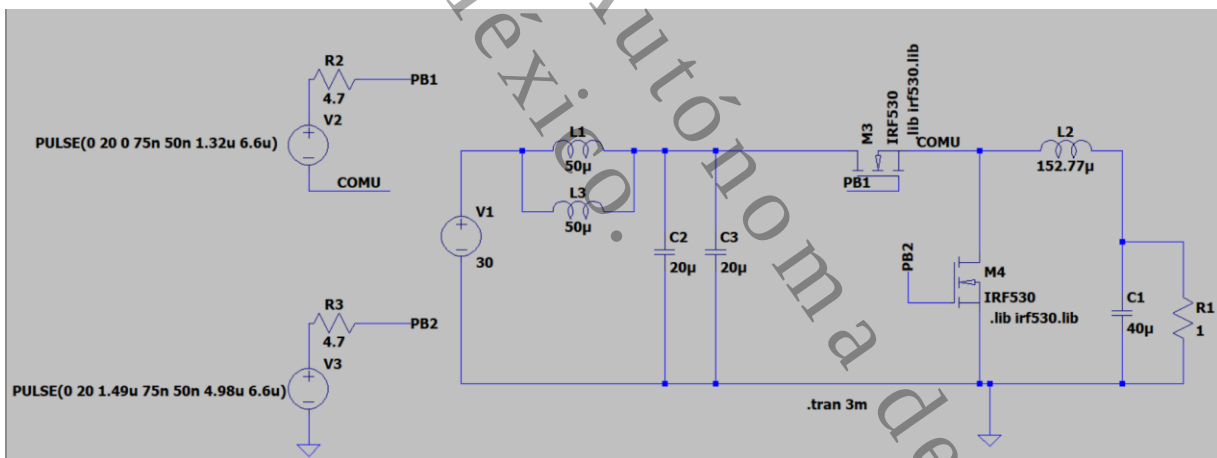
$$n = \frac{p_o \times 100}{P_{in}} \quad (4.41)$$

$$n = \frac{33.75 \times 100}{37.95} = 88.94 \% \quad (4.42)$$

Caso 2: Convertidor Buck monofase síncrono en MCC

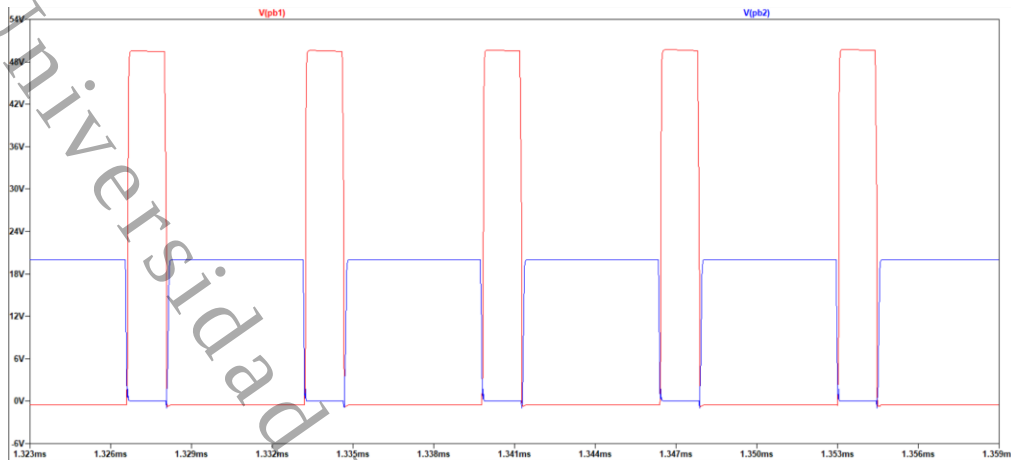
En la Figura 4.10 se muestra el diagrama del convertidor Buck con rectificación síncrona, el cual requiere del control de dos interruptores, donde el diodo es sustituido por un interruptor en contraste con la topología asíncrona.

Figura 4.10. Diagrama eléctrico del convertidor Buck monofase con rectificación síncrona



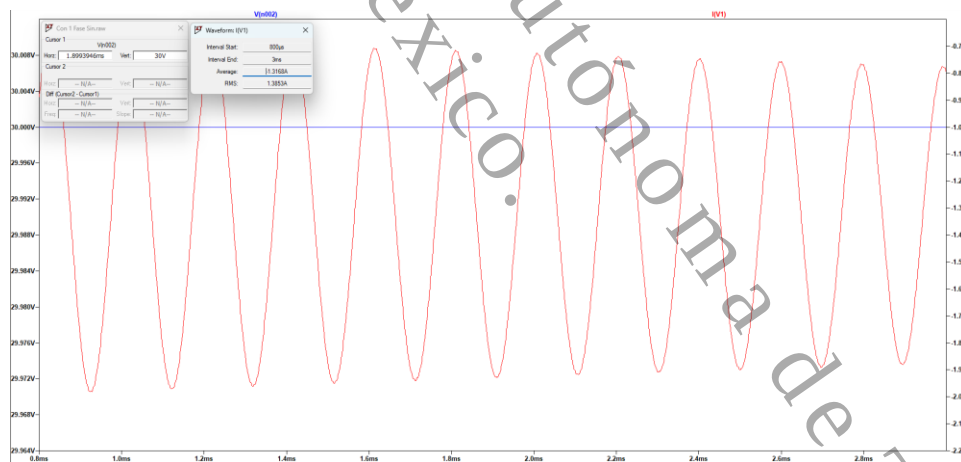
En la Figura 4.11 se ilustra una gráfica sobre pulsos de disparo para el caso del convertidor Buck monofase síncrono, donde los pulsos rojos representan los disparos del interruptor superior, mientras que los pulsos azules representan los disparos del interruptor inferior.

Figura 4.11. Pulsos de disparo del convertidor Buck monofase síncrono



En la Figura 4.12 se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada del caso 2, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 1.31 A, mientras que el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.12. Señales de corriente y voltaje de entrada del Convertidor Buck monofase con rectificación síncrona

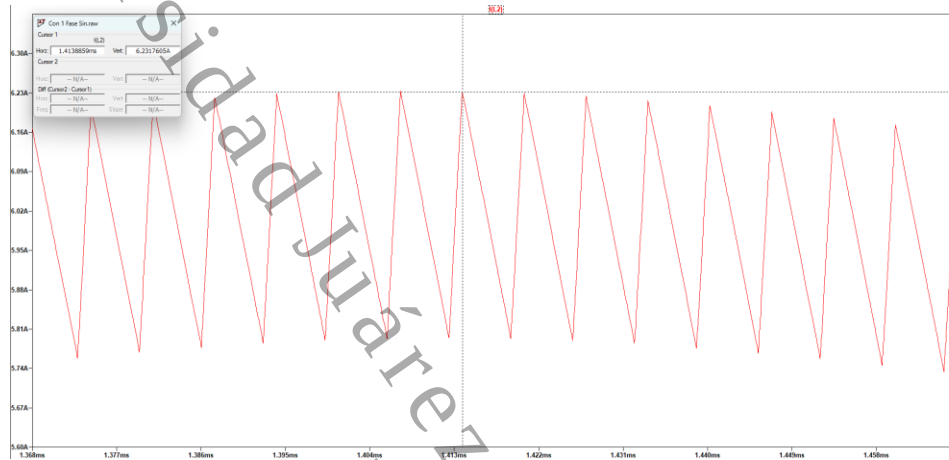


En (4.43) se muestra el cálculo de potencia de entrada usando las mediciones de voltaje de entrada y corriente de entrada, se observa que la potencia es de 39.3 W.

$$P_{in} = 30 \times 1.31 = 39.3 \text{ W} \quad (4.43)$$

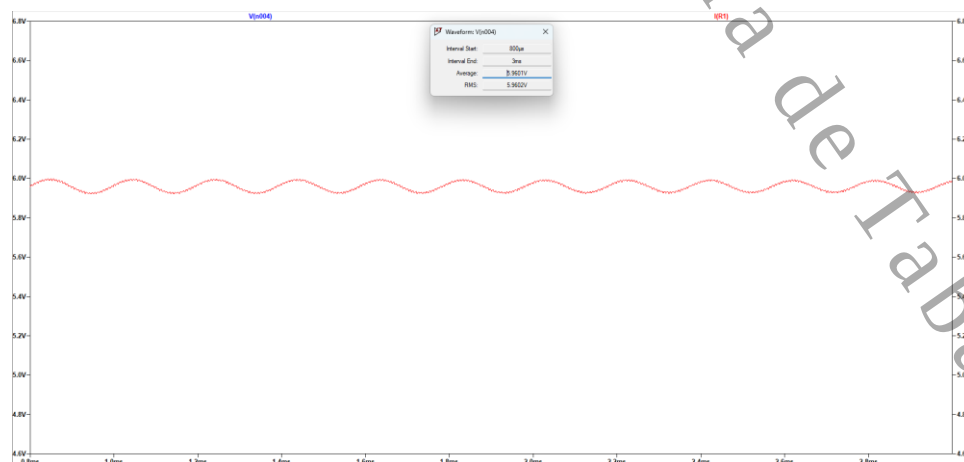
En la Figura 4.13 se observa el comportamiento de la corriente del inductor del convertidor monofase síncrono, donde se muestra que el pico de corriente es de 6.23 A.

Figura 4.13. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación síncrona en MCC



En la Figura 4.14 se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida del caso 2, en donde se muestra que la corriente de salida es de 5.96 A, al igual que el voltaje de salida es de 5.96 V.

Figura 4.14. Señales de corriente y voltaje de salida del convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona



En (4.44) se muestra el cálculo de potencia de salida usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida, se observa que la potencia es de 35.52 W.

$$P_o = 5.96 \times 5.96 = 35.52 \text{ W} \quad (4.44)$$

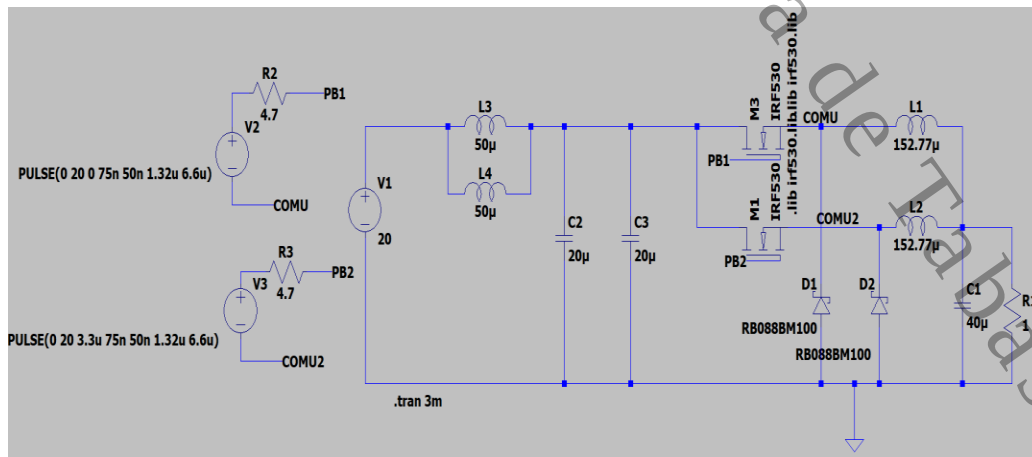
Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.45) se muestra el cálculo de la eficiencia del convertidor, para el caso 2 en la prueba a 30 V, se observa que la eficiencia es de 90.38 %.

$$n = \frac{35.52 \times 100}{39.3} = 90.38 \% \quad (4.45)$$

Caso 3: Convertidor Buck multifase Asíncrono en MCC

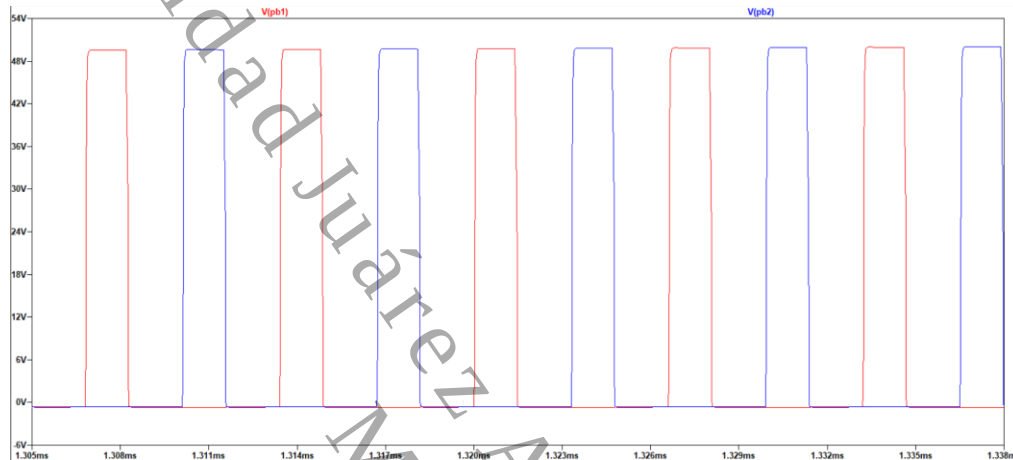
En la Figura 4.15 se muestra el diagrama del convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona, el cual requiere del control de dos interruptores, los cuales corresponden a los interruptores superiores de cada fase. Ahora al utilizar un convertidor Multifase su cantidad de componentes aumenta como lo son: MOSFETs (interruptores), componente de rectificación e inductores.

Figura 4.15. Diagrama eléctrico del Convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona



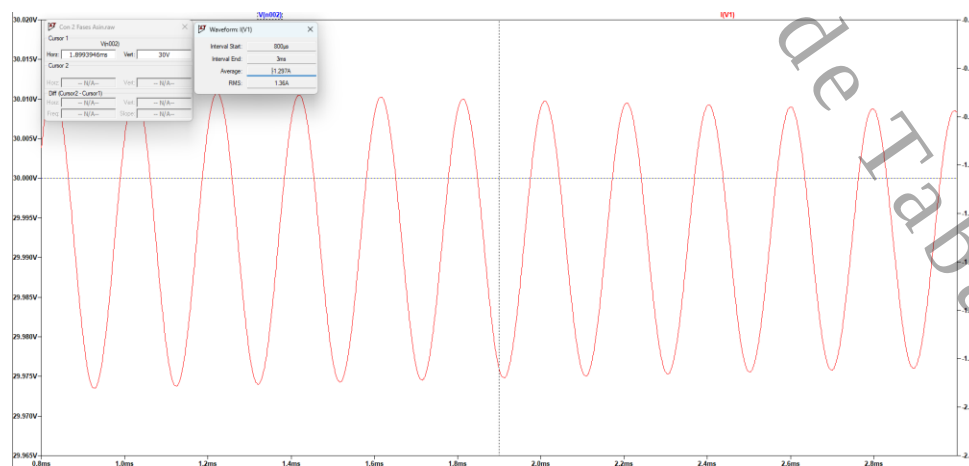
En la Figura 4.16 se ilustra una gráfica sobre los pulsos de disparo para el caso del convertidor Buck multifase asíncrono, donde se observa que los pulsos rojos corresponden a la primera fase del convertidor, mientras que los pulsos azules corresponden a la segunda fase del convertidor, donde pertenecen a los interruptores superiores respectivamente.

Figura 4.16. Pulsos de disparo del convertidor Buck multifase asíncrono



En la Figura 4.17 se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada del caso 3, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 1.29 A, mientras que el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.17. Señales de corriente y voltaje de entrada del convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona

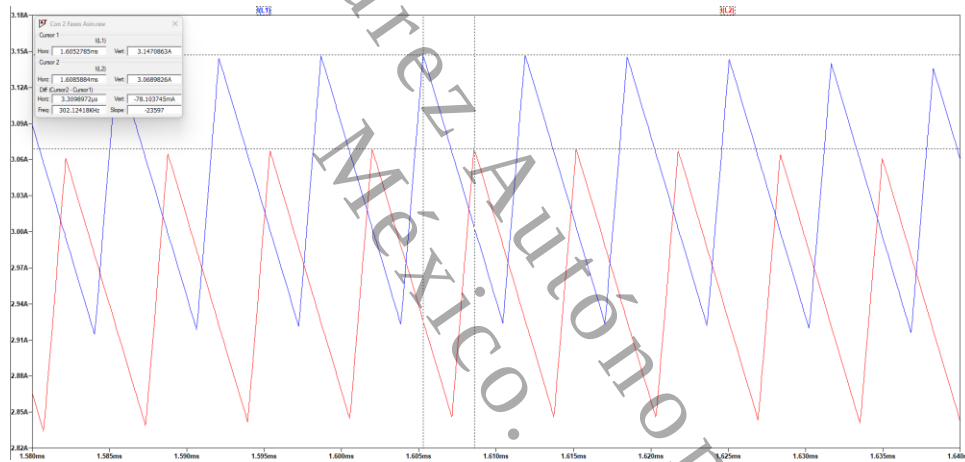


En (4.46) muestra el cálculo de potencia de entrada, usando las mediciones de voltaje de entrada y corriente de entrada, se observa que la potencia es de 38.7 W.

$$P_{in} = 30 \times 1.29 = 38.7 \text{ W} \quad (4.46)$$

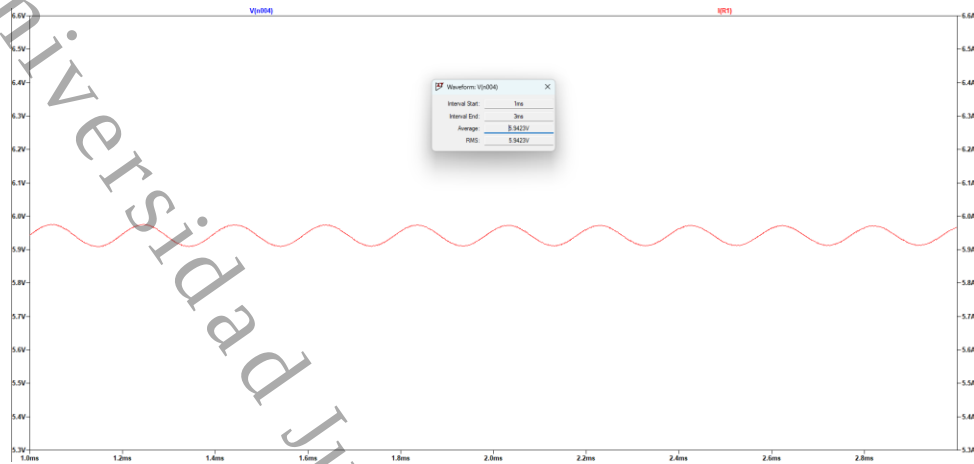
en la Figura 4.18 se observa el comportamiento de la corriente por inductor. La corriente pico de L1 es de 3.14 A, mientras que la corriente pico de L2 es de 3.06 A

Figura 4.18. Señales de corrientes de los inductores en un convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona en MCC



En la Figura 4.19 se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida del caso 3, en donde se muestra que la corriente de salida es de 5.94 A, al igual que el voltaje de salida es de 5.94 V.

Figura 4.19. Señales de corriente y voltaje de salida del convertidor Buck multifase con rectificación asíncrona



En (4.47) se muestra el cálculo de potencia de salida, usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida, se observa que la potencia es de 35.28 W.

$$P_o = 5.94 \times 5.94 = 35.28 \text{ W} \quad (4.47)$$

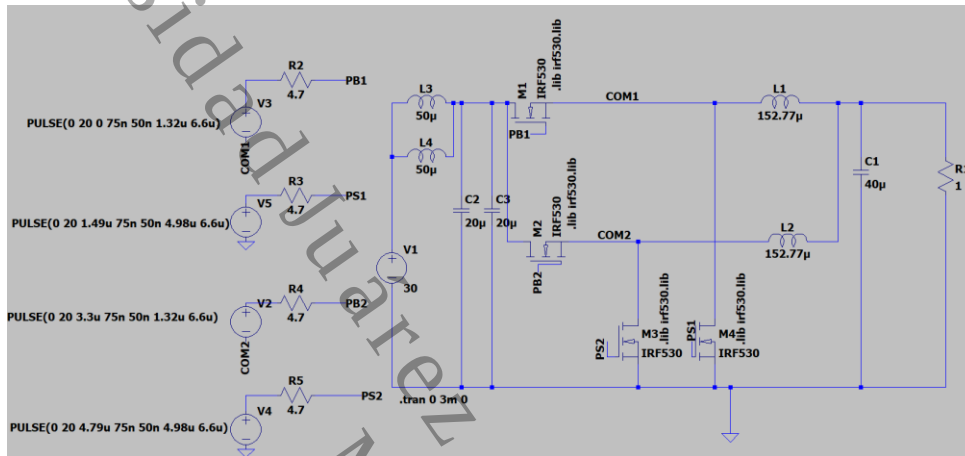
Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.48) se muestra el cálculo de la eficiencia del convertidor, para el caso 3 en la prueba a 30 V, se observa que la eficiencia es de 91.17 %.

$$n = \frac{35.28 \times 100}{38.7} = 91.17 \% \quad (4.48)$$

Caso 4: Convertidor Buck multifase síncrono en MCC

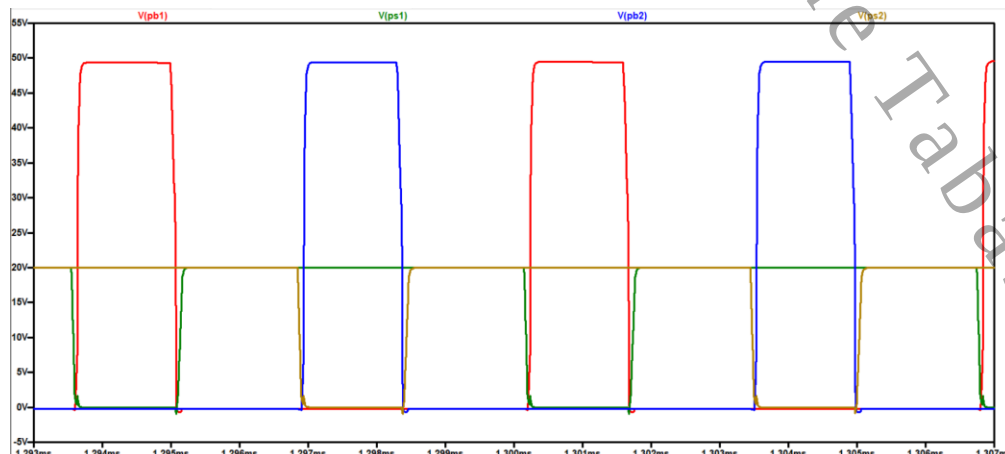
En la Figura 4.20 se muestra el diagrama del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona, el cual requiere del control de cuatro interruptores es decir dos interruptores por cada fase del convertidor.

Figura 4.20. Diagrama eléctrico del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona



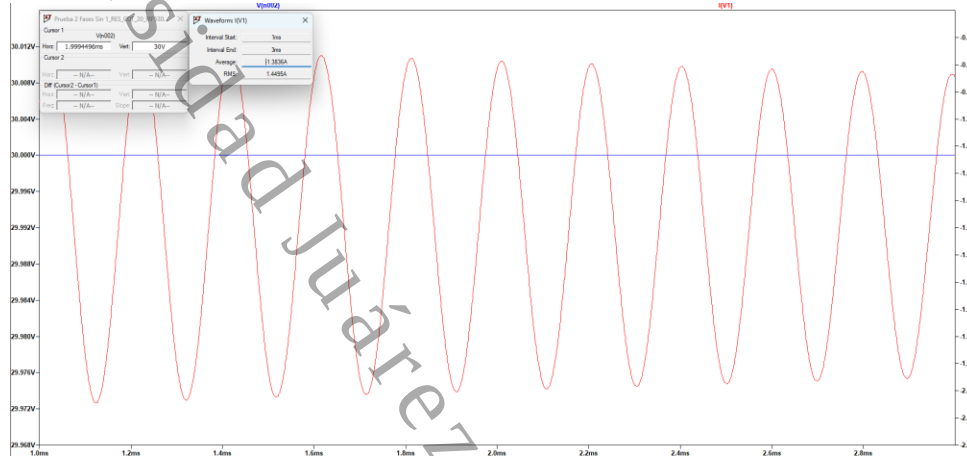
En la Figura 4.21 se presenta una gráfica sobre los pulsos de disparo para los cuatro interruptores en el caso del convertidor Buck multifase síncrono, donde se observa que el pulso del interruptor superior de la primera fase es de color rojo, el interruptor inferior de la primera fase es de color verde, el interruptor superior de la segunda fase es de color azul y en el interruptor inferior de la segunda fase es de color amarillo.

Figura 4.21. Pulsos de disparo del convertidor Buck multifase síncrono



En la Figura 4.22 se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada del caso 4, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 1.38 A, mientras que el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.22. Señales de corriente y voltaje de entrada del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona

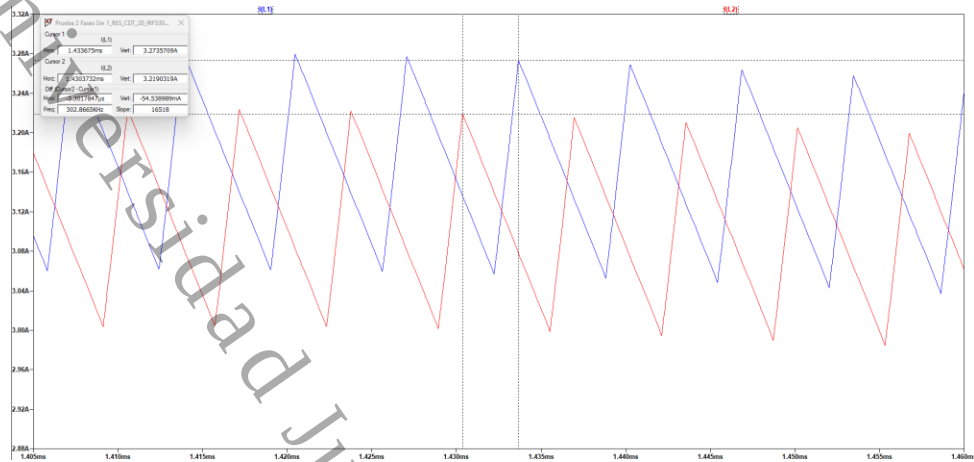


En (4.49) se muestra el cálculo de potencia de entrada usando las mediciones de voltaje de entrada y corriente de entrada, se observa que la potencia es de 41.4 W.

$$P_{in} = 30 \times 1.38 = 41.4 \text{ W} \quad (4.49)$$

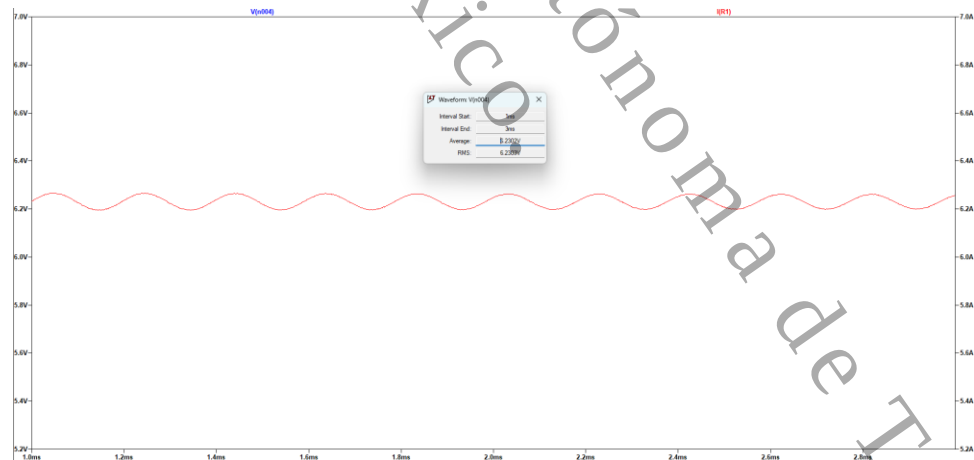
En la Figura 4.23 se observa el comportamiento de la corriente por inductor. La corriente pico de L1 es de 3.27 A, mientras que la corriente pico de L2 es de 3.21 A.

Figura 4.23. Señales de corrientes de los inductores en un convertidor Buck multifase con rectificación síncrona en MCC



En la Figura 4.24 se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida del caso 4, en donde se muestra que la corriente de salida es de 6.23 A, al igual que el voltaje de salida es de 6.23 V.

Figura 4.24. Señales de corriente y voltaje de salida del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona



En (4.50) se muestra el cálculo de potencia de salida, usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida, se observa que la potencia es de 38.81 W.

$$P_o = 6.23 \times 6.23 = 38.81 \text{ W} \quad (4.50)$$

Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.51) se muestra el cálculo de la eficiencia del convertidor, para el caso 4 en la prueba a 30 V que la eficiencia es de 93.75 %.

$$n = \frac{38.81 \times 100}{41.4} = 93.75 \% \quad (4.51)$$

En la siguiente Tabla 4.3 se presenta un resumen de los datos obtenidos en las simulaciones de los cuatro casos posibles.

Tabla 4.3. Comparación de resultados de simulaciones							
Convertidores B /Parametros	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	V _o (V)	I _o (A)	P _o (W)	Eficiencia (%)
Monofase asíncrono	30	1.265	37.95	5.81	5.81	33.7561	88.94888011
Monofase síncrono	30	1.31	39.3	5.96	5.96	35.5216	90.38575064
Multifase asíncrono	30	1.29	38.7	5.94	5.94	35.2836	91.17209302
Multifase síncrono	30	1.38	41.4	6.23	6.23	38.8129	93.75096618

4.2 Implementación Física

En el caso de la implementación física las mediciones de voltaje se realizaron con una “punta de voltaje diferencial” y las mediciones de corriente con una “punta de corriente”, las cuales se visualizaron en un osciloscopio “tektronix TDS 1012B”. Además, para validar los resultados se tomaron las mediciones de corriente y voltaje de entrada que mostró en pantalla la fuente de CD “multicomp pro” con la que se alimentó el convertidor, para la salida el valor de corriente y voltaje que indicaba la carga electrónica. En la Tabla 4.4 se muestran las formas en las se visualizaron las mediciones.

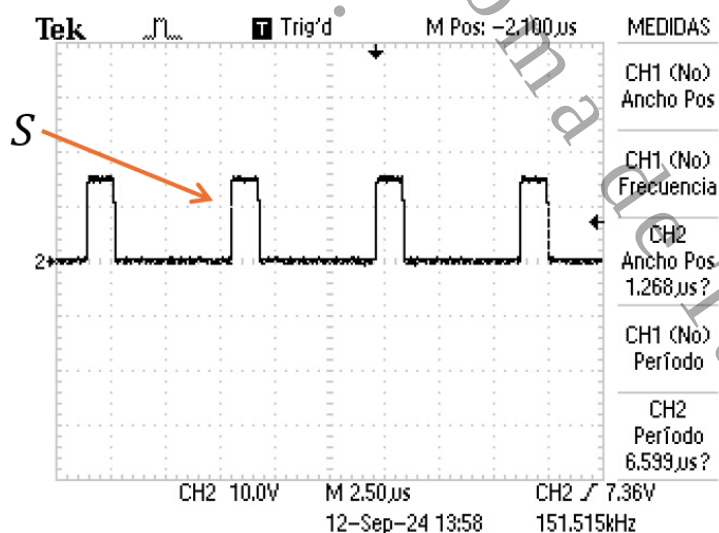
Tabla 4.4. Mediciones físicas

Mediciones	
Osciloscopio	Fuente y Carga

Caso 1: Convertidor Buck monofase asíncrono en MCC

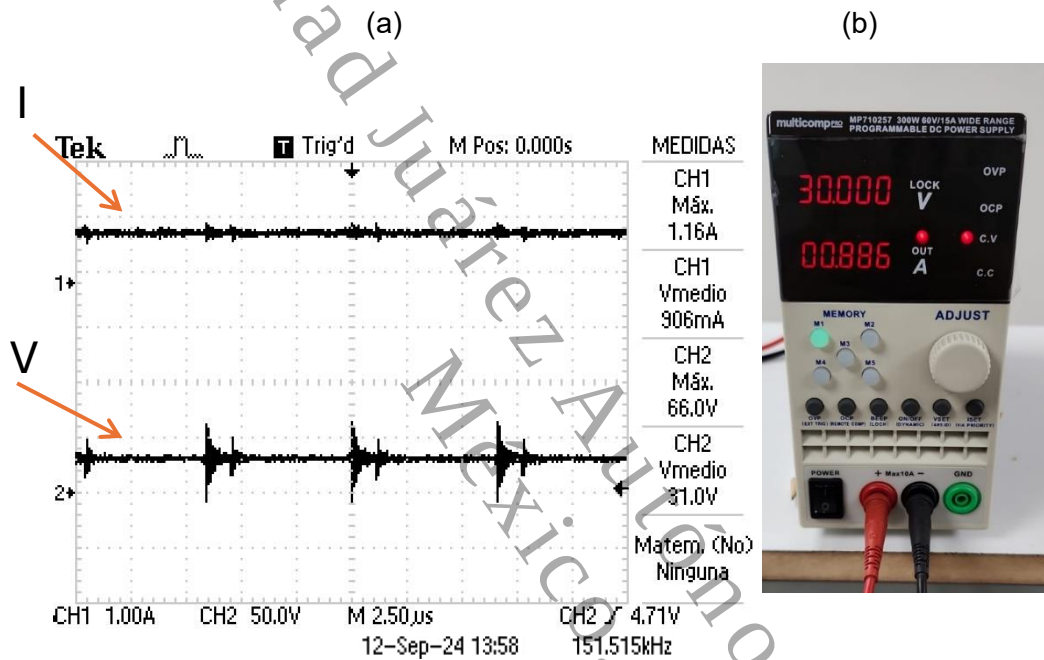
En la Figura 4.25 se muestra el pulso de disparo del interruptor superior “S” para caso del convertidor Buck monofase.

Figura 4.25. Pulso del interruptor superior



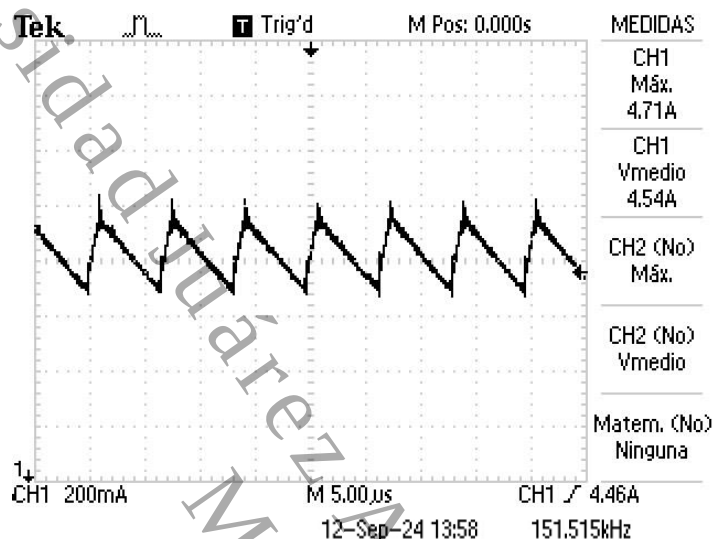
En la Figura 4.26 (a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 0.906 A, mientras que el voltaje de entrada es de 31 V y en la Figura 4.26 (b) se presenta la medición realizada con la fuente de alimentación del convertidor, en la cual la corriente de entrada es de 0.886 A, mientras el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.26. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de fuente de alimentación



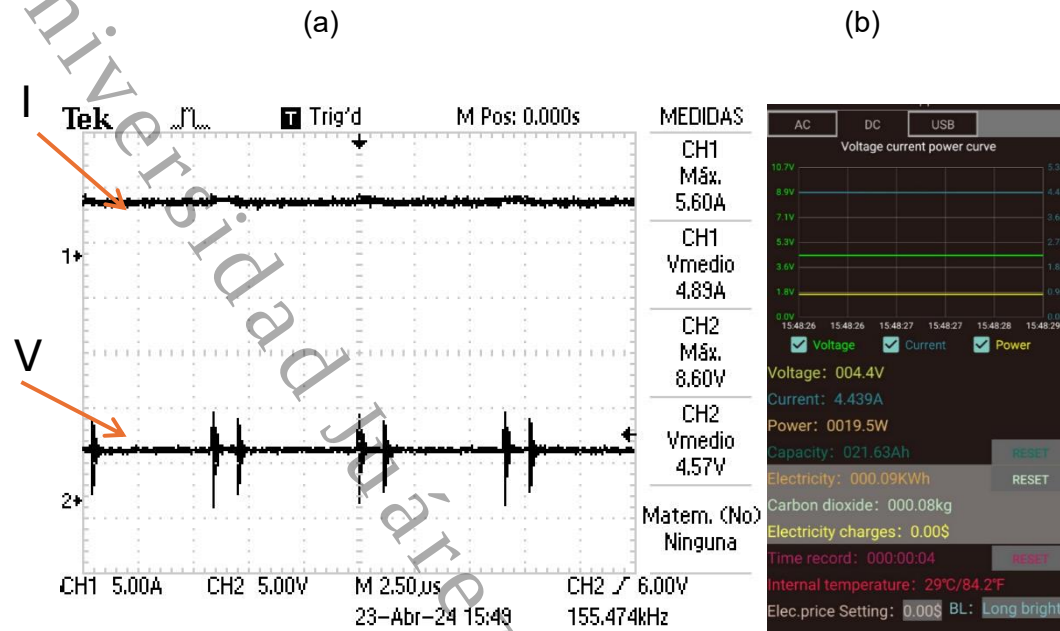
En la Figura 4.27 se muestra el comportamiento de la corriente del inductor del convertidor monofase asíncrono, donde se muestra que el pico de corriente es de 4.71 A.

Figura 4.27. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona en MCC



En la Figura 4.28 a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida, en donde se muestra que la corriente de salida es de 4.89 A, mientras que el voltaje de salida es de 4.57 V, en la Figura 4.28 b) se presenta la medición realizada con la carga del convertidor, en la cual la corriente de salida es de 4.43 A, mientras el voltaje de salida es de 4.4 V.

Figura 4.28. (a) Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor



En (4.54) se muestra el cálculo de potencia de salida usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida presentadas por el osciloscopio, donde se observa que la potencia es de 8.09 W, mientras que en (4.55) se muestra la potencia de salida con las mediciones de la fuente de alimentación de convertidor siendo de 7.452 W.

$$P_o = 4.57 \times 4.89 = 22.34 \text{ W} \quad (4.54)$$

$$P_o = 4.4 \times 4.43 = 19.49 \text{ W} \quad (4.55)$$

Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.56) y (4.57) se muestran las eficiencias del convertidor, se promedian las eficiencias calculadas (osciloscopio y fuente de alimentación/carga) usando (4.58). En (4.59) para caso 1 en la prueba a 30 V que la eficiencia total es del 76.45 %.

$$n_{osci} = \frac{22.34 \times 100}{28.08} = 79.56 \% \quad (4.56)$$

$$n_{fuen} = \frac{19.49 \times 100}{26.58} = 73.33 \% \quad (4.57)$$

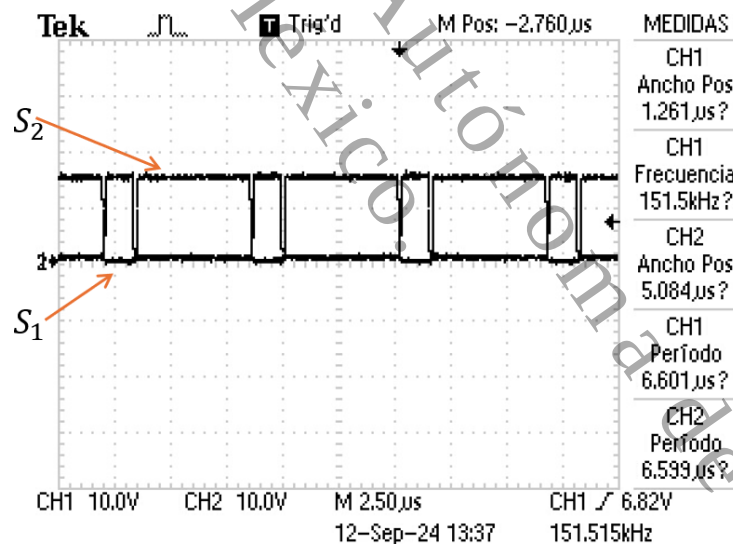
$$n_t = \frac{n_{osci} + n_{fuen}}{2} \quad (4.58)$$

$$n_t = 76.4503 \% \quad (4.59)$$

Caso 2: Convertidor Buck monofase síncrono en MCC

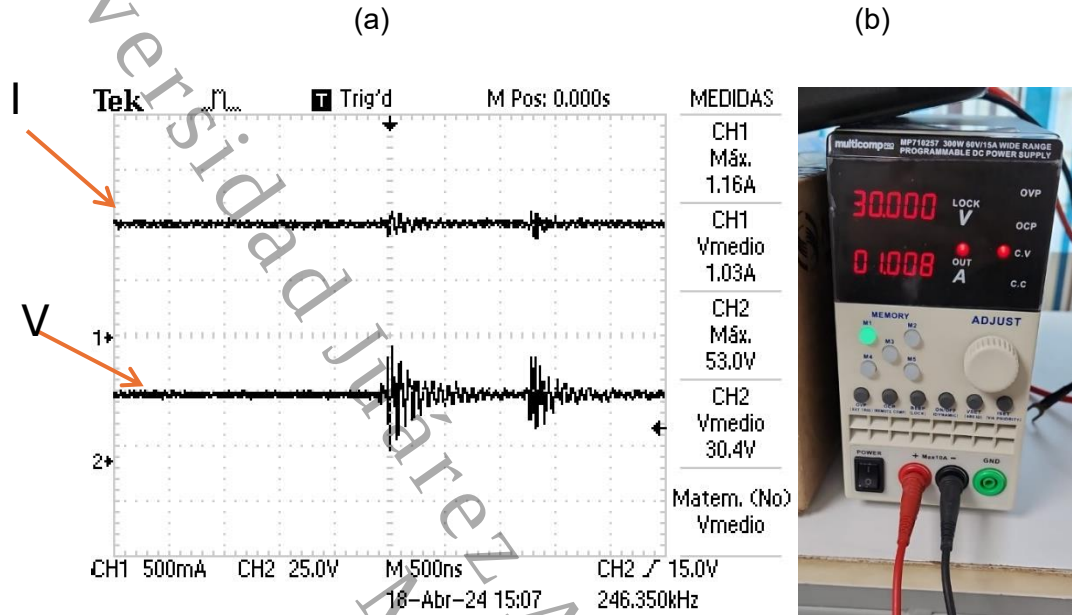
En la Figura 4.29 se muestra los pulsos de disparo de los interruptores superior S_1 e inferior S_2 respectivamente, para caso del convertidor Buck monofase síncrono.

Figura 4.29. Pulsos de los interruptores superior e inferior



En la Figura 4.30 a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 1.03 A, mientras que el voltaje de entrada es de 30.4 V, en la Figura 4.30 b) se presenta la medición realizada con la fuente de alimentación del convertidor, en la cual la corriente de entrada es de 1.008 A, mientras el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.30. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de la fuente de alimentación convertidor



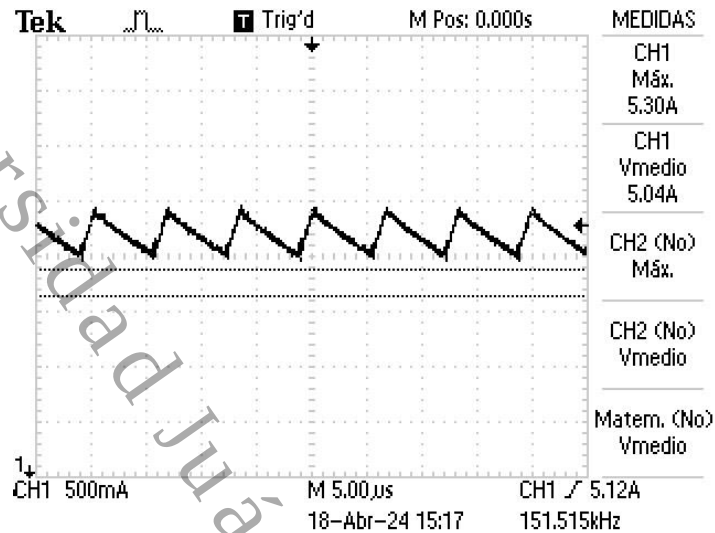
En (4.60) se muestra el cálculo de potencia de entrada usando las mediciones de voltaje de entrada y corriente de entrada presentadas por el osciloscopio, donde se observa que la potencia es de 31.312 W, mientras que en (4.61) se muestra la potencia de entrada con las mediciones de la fuente de alimentación de convertidor siendo de 30.24 W.

$$P_{in} = 30.4 \times 1.03 = 31.31 \text{ W} \quad (4.60)$$

$$P_{in} = 30 \times 1.008 = 30.24 \text{ W} \quad (4.61)$$

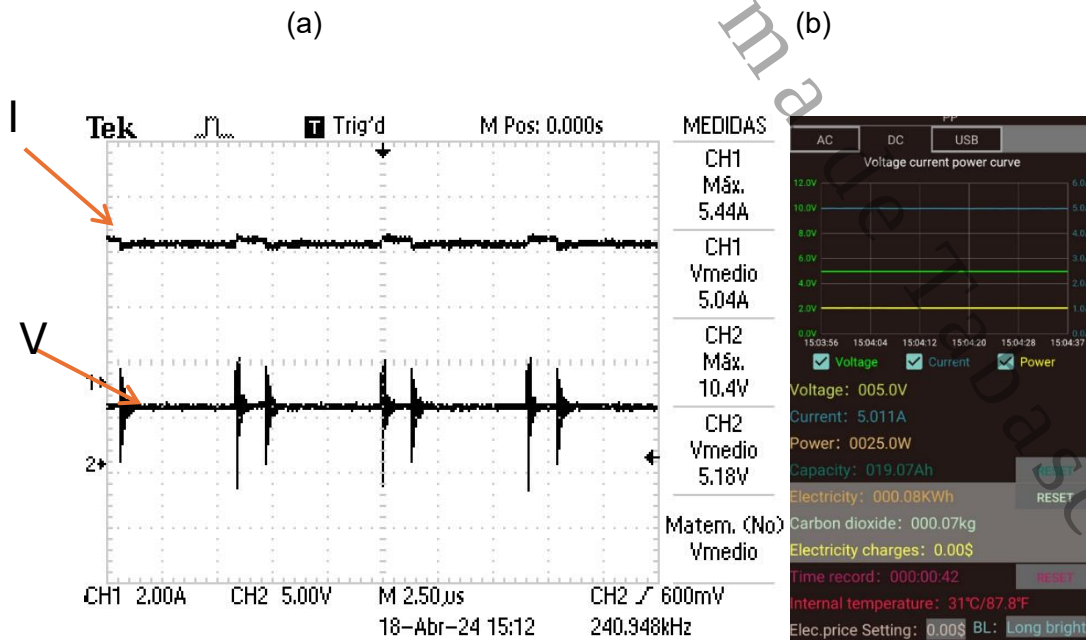
En la Figura 4.31 se muestra el comportamiento de la corriente del inductor del convertidor monofase síncrono, donde se muestra que el pico de corriente es de 5.3 A.

Figura 4.31. Señal de corriente del inductor en un convertidor Buck monofase con rectificación síncrona en MCC



En la Figura 4.32 a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida, en donde se muestra que la corriente de salida es de 5.04 A, mientras que el voltaje de salida es de 5.18 V, en la Figura 4.32 b) se presenta la medición realizada con la carga del convertidor, en la cual la corriente de salida es de 5.011 A, mientras el voltaje de salida es de 5 V.

Figura 4.32. (a) Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor



En (4.62) se muestra el cálculo de potencia de salida usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida presentadas por el osciloscopio, donde se observa que la potencia es de 26.10 W, mientras que en (4.63) se muestra la potencia de salida con las mediciones de la fuente de alimentación de convertidor siendo de 25.11 W.

$$P_o = 5.18 \times 5.04 = 26.10 \text{ W} \quad (4.62)$$

$$P_o = 5 \times 5.01 = 25.11 \text{ W} \quad (4.63)$$

Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.64) y (4.65) se muestra las eficiencias del convertidor, se promedian las eficiencias calculadas (osciloscopio y fuente de alimentación/carga). En (4.66) para el 2 en la prueba a 30 V que la eficiencia total es del 83.2068 %.

$$n_{osci} = \frac{26.1072 \times 100}{31.312} = 83.3776 \% \quad (4.64)$$

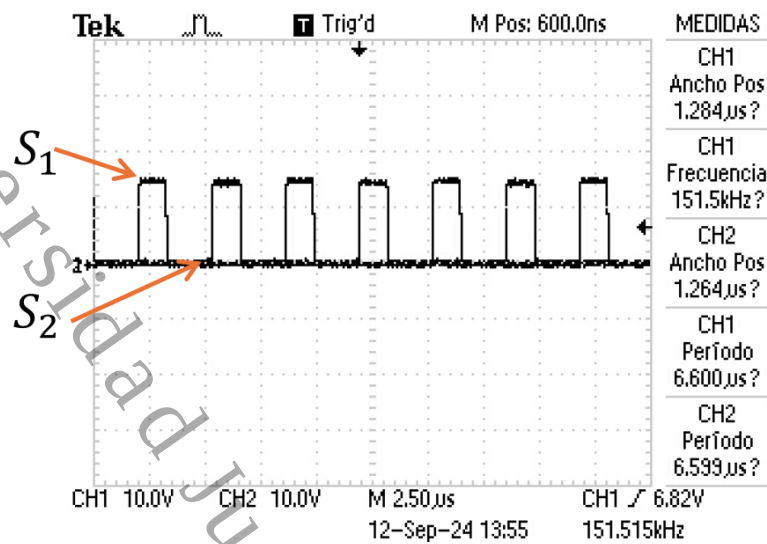
$$n_{fuen} = \frac{25.1101 \times 100}{30.24} = 83.0361 \% \quad (4.65)$$

$$n_t = 83.2068 \% \quad (4.66)$$

Caso 3: Convertidor Buck multifase Asíncrono en MCC

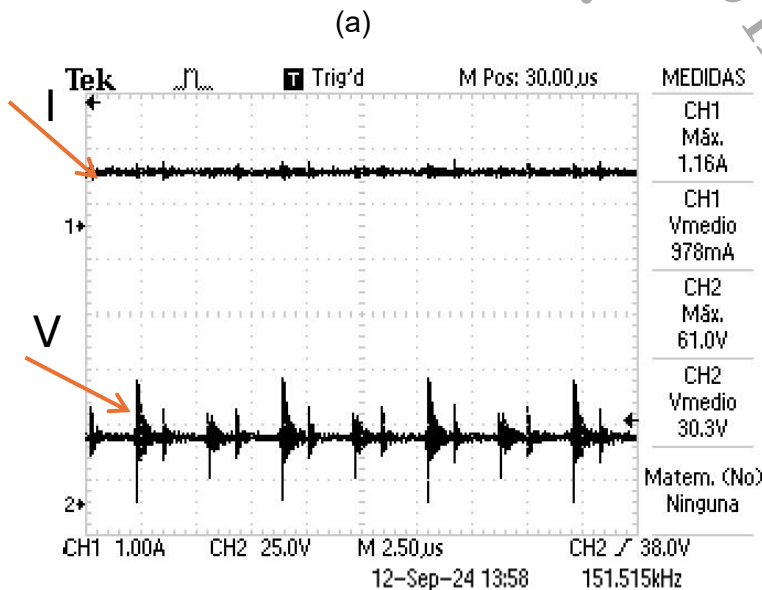
En la Figura 4.33 se muestra los pulsos de disparo de los interruptores, siendo S_1 el pulso del interruptor de la primera fase y S_2 el pulso del interruptor de la segunda fase, para caso del convertidor Buck multifase asíncrono.

Figura 4.33. Pulsos de los interruptores superiores



En la Figura 4.34 (a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 0.978 A, mientras que el voltaje de entrada es de 30.3 V, en la Figura 4.34 (b) se presenta la medición realizada con la fuente de alimentación del convertidor, en la cual la corriente de entrada es de 0.936 A, mientras el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.34. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de fuente de alimentación del convertidor



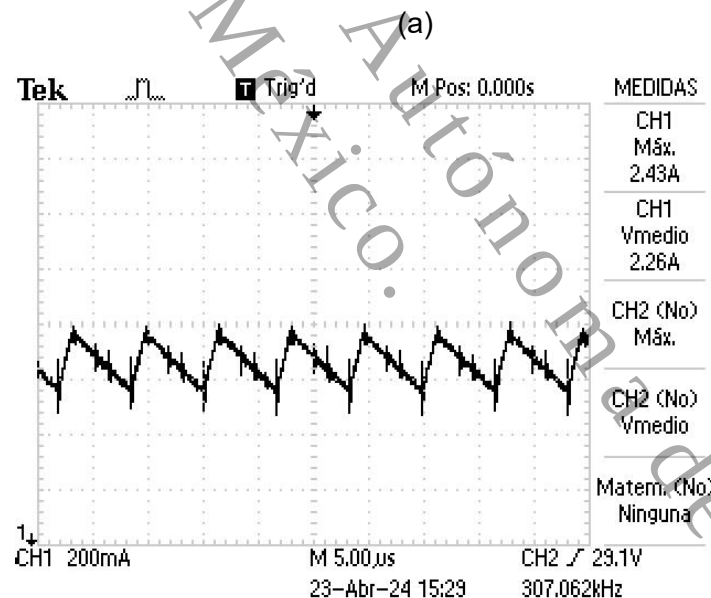
En (4.67) se muestra el cálculo de potencia de entrada usando las mediciones de voltaje de entrada y corriente de entrada presentadas por el osciloscopio, donde se observa que la potencia es de 29.63 W, mientras que en (4.68) muestra la potencia de entrada con las mediciones de la fuente de alimentación de convertidor siendo de 28.08 W.

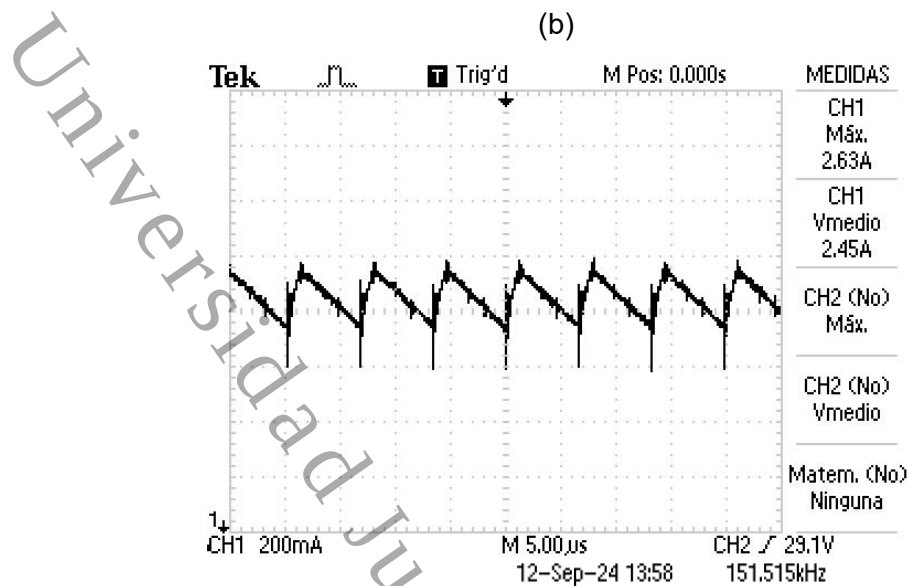
$$P_{in} = 30.3 \times 0.97 = 29.63 \text{ W} \quad (4.67)$$

$$P_{in} = 30 \times 0.93 = 28.08 \text{ W} \quad (4.68)$$

La Figura 4.35 (a) muestra la corriente pico del inductor L_1 siendo de 2.43 A, mientras que en la Figura 4.31 (b) se presenta la corriente pico de inductor L_2 siendo de 2.63 A.

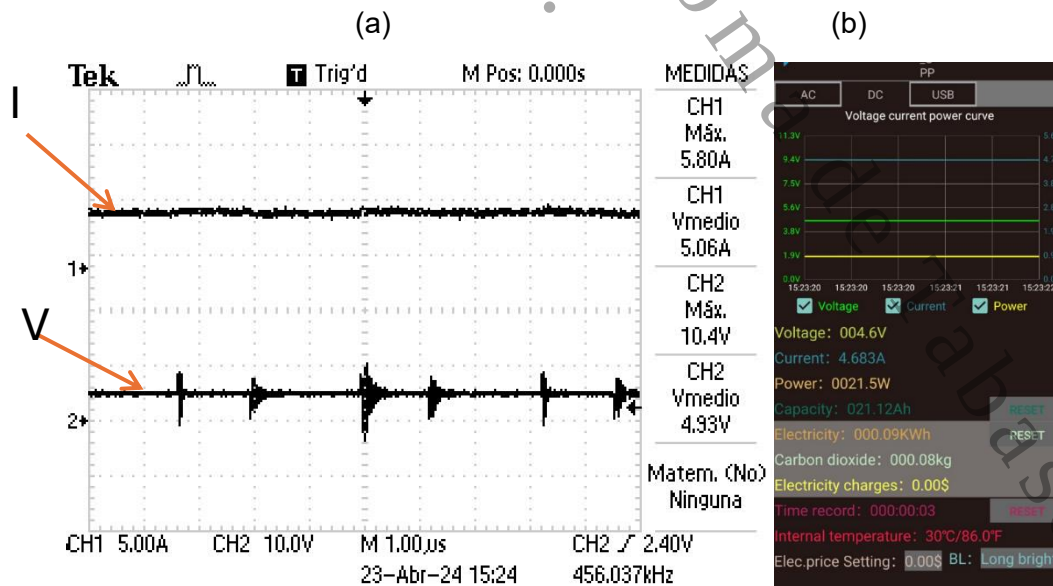
Figura 4.35. (a) señal de corriente del inductor L_1 (b) señal de corriente del inductor L_2





En la Figura 4.36 a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida, en donde se muestra que la corriente de salida es de 5.06 A, mientras que el voltaje de salida es de 4.93 V, en la Figura 4.36 b) se presenta la medición realizada con la carga del convertidor, en la cual la corriente de salida es de 4.68 A, mientras el voltaje de salida es de 4.6 V.

Figura 4.36. (a) Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor



En (4.69) se muestra el cálculo de potencia de salida usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida presentadas por el osciloscopio, donde se observa que la potencia es de 24.94 W, mientras que en (4.70) se muestra la potencia de salida con las mediciones de la fuente de alimentación de convertidor siendo de 21.90 W.

$$P_o = 4.93 \times 5.06 = 24.94 \text{ W} \quad (4.69)$$

$$P_o = 4.6 \times 4.68 = 21.90 \text{ W} \quad (4.70)$$

Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.71) y (4.72) se muestran las eficiencias del convertidor, se promedian las eficiencias calculadas (osciloscopio y fuente de alimentación/carga). En (4.73) para el caso 3 en la prueba a 30 V que la eficiencia total es del 81.09 %.

$$n_{osci} = \frac{24.94 \times 100}{29.63} = 84.18 \% \quad (4.71)$$

$$n_{fuen} = \frac{21.90 \times 100}{28.08} = 78 \% \quad (4.72)$$

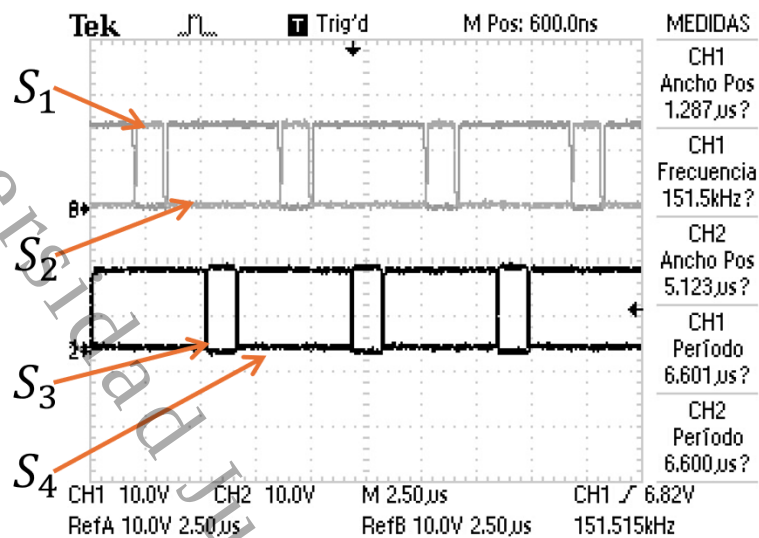
$$n_t = 81.06 \% \quad (4.73)$$

Caso 4: Convertidor Buck multifase síncrono en MCC

El desfase entre pulso es crucial en la topología multifase síncrona, debido a que un desfase erróneo puede afectar el comportamiento y las características del convertidor.

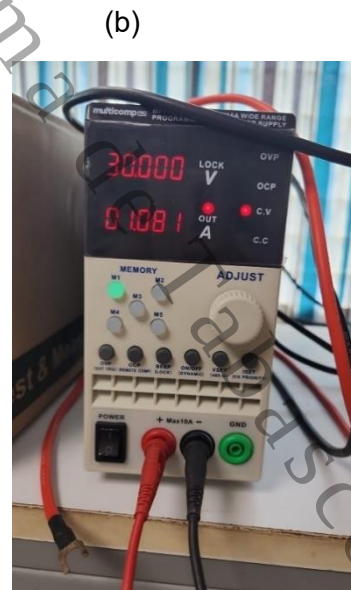
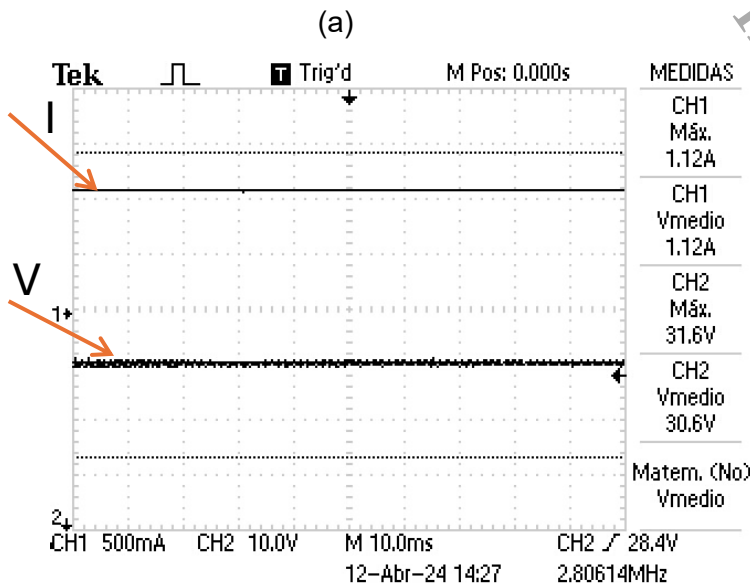
En la Figura 4.37, se muestra los pulsos de disparo de los interruptores, siendo S_1 el pulso del interruptor superior, S_2 el pulso del interruptor inferior correspondientes a la primera fase, mientras que S_3 es el pulso del interruptor superior y S_2 el pulso del interruptor inferior correspondientes a la segunda fase, para el caso del convertidor Buck multifase síncrono.

Figura 4.37. Pulsos de los interruptores



Por último, se presenta la prueba del caso 4, En la Figura 4.38 (a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de entrada, en donde se muestra que la corriente de entrada es de 1.12 A, mientras que el voltaje de entrada es de 30.6 V, en la Figura 4.38 (b) se presenta la medición realizada con la fuente de alimentación del convertidor, en la cual la corriente de entrada es de 1.081 A, mientras el voltaje de entrada es de 30 V.

Figura 4.38. (a) Gráfica de voltaje y corriente de entrada (b) Medición de fuente de alimentación del convertidor



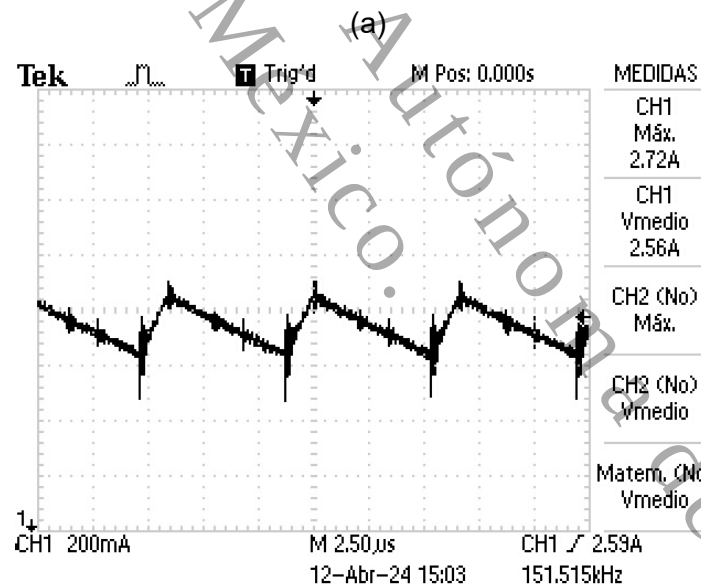
En (4.74) se muestra el cálculo de potencia de entrada usando las mediciones de voltaje de entrada y corriente de entrada presentadas por el osciloscopio, donde se observa que la potencia es de 33.66 W, mientras que en (4.75) se muestra la potencia de entrada con las mediciones de la fuente de alimentación de convertidor siendo de 32.4 W.

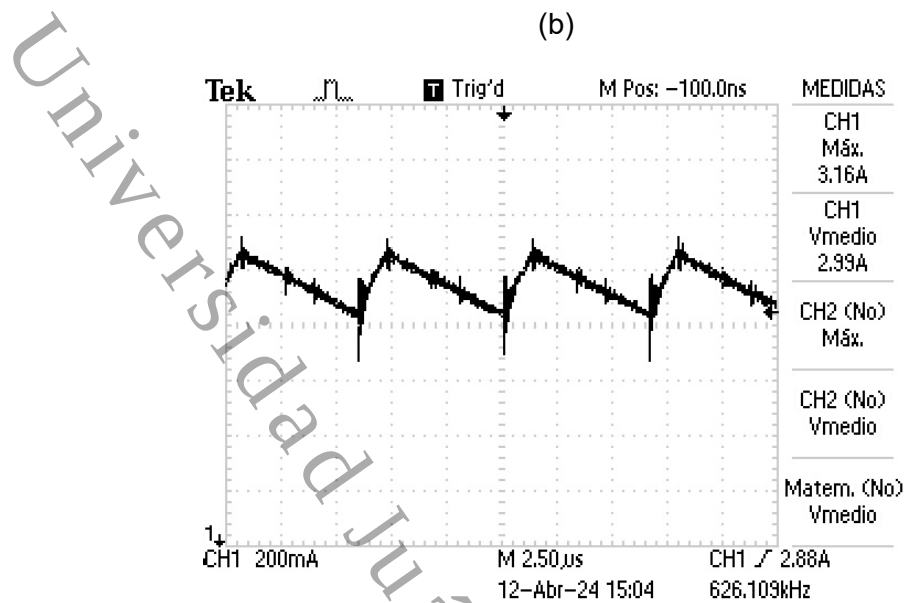
$$P_{in} = 30.6 \times 1.12 = 33.66 \text{ W} \quad (4.74)$$

$$P_{in} = 30 \times 1.08 = 32.4 \text{ W} \quad (4.75)$$

La Figura 4.39 a) muestra la corriente pico del inductor L_1 siendo de 2.72 A, mientras que en la Figura 4.39 b) se presenta la corriente pico de inductor L_2 siendo de 3.16 A.

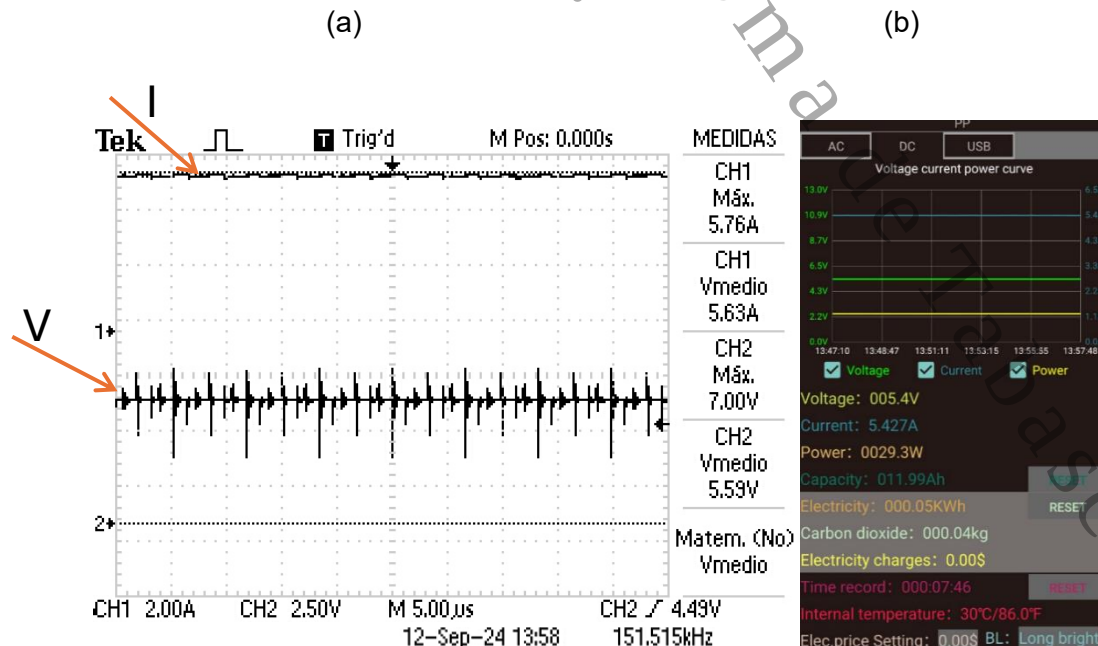
Figura 4.39. (a) Señal de corriente del inductor L_1 (b) Señal de corriente del inductor L_2





En la Figura 4.40 a) se observa la gráfica de voltaje y corriente de salida, en donde se muestra que la corriente de salida es de 5.63 A, mientras que el voltaje de salida es de 5.59 V, en la Figura 4.40 b) se presenta la medición realizada con la carga del convertidor, en la cual la corriente de salida es de 5.427 A, mientras el voltaje de salida es de 5.4 V.

Figura 4.40. Gráfica de voltaje y corriente de salida (b) Medición de carga del convertidor



En (4.76) se muestra el cálculo de potencia de salida usando las mediciones de voltaje de salida y corriente de salida presentadas por el osciloscopio, donde se observa que la potencia es de 31.47 W, mientras que (4.77) muestra la potencia de entrada con las mediciones de la fuente de alimentación de convertidor siendo de 29.48 W.

$$P_o = 5.59 \times 5.63 = 31.47 \text{ W} \quad (4.76)$$

$$P_o = 5.4 \times 5.42 = 29.48 \text{ W} \quad (4.77)$$

Con los valores de potencia de entrada y potencia de salida, en (4.78) y (4.79) se muestran las eficiencias del convertidor, se promedian las eficiencias calculadas (osciloscopio y fuente de alimentación/carga). En (4.80) para el caso 4 en la prueba a 30 V que la eficiencia total es del 92.25 %.

$$n_{osci} = \frac{31.47 \times 100}{33.66} = 93.49 \% \quad (4.78)$$

$$n_{fuen} = \frac{29.48 \times 100}{32.4} = 91\% \quad (4.79)$$

$$n_t = 92.25 \% \quad (4.)$$

En la siguiente Tabla 4.5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la implementación física.

Tabla 4.5. Comparación de resultados físicos										
Convertidores	Medición	Prueba	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	V _o (V)	I _o (A)	P _o (W)	Eficiencia (%)	Eficiencia T (%)
Monofase Asíncrono	Osciloscopio	30	31	0.906	28.086	4.57	4.89	22.3473	79.56740013	76.45036673
	Fuente/Carga		30	0.886	26.58	4.4	4.43	19.492	73.33333333	
Monofase Síncrono	Osciloscopio	30	30.4	1.03	31.312	5.18	5.04	26.1072	83.3776188	83.20686661
	Fuente/Carga		30	1.008	30.24	5.011	5.011	25.110121	83.03611442	
Multifase Asíncrono	Osciloscopio	30	30.3	0.978	29.6334	4.93	5.06	24.9458	84.18136292	81.09068146
	Fuente/Carga		30	0.936	28.08	4.68	4.68	21.9024	78	
Multifase Síncrono	Osciloscopio	30	30.6	1.1	33.66	5.59	5.63	31.4717	93.49881165	92.25079471
	Fuente/Carga		30	1.08	32.4	5.43	5.43	29.4849	91.00277778	

En la Tabla 4.6 se muestra una comparación de pérdidas de potencia y eficiencia de los convertidores en los casos teóricos, simulados e implementación física.

Tabla 4.6. Pérdidas de potencia teórica, simulación e implementación física				
Implementación	Párametros	Pin (W)	Po (W)	Eficiencia (%)
Simulación	Monofase asíncrono	37.95	33.75	88.93280632
	Monofase síncrono	39.3	35.52	90.38167939
	Multifase asíncrono	38.7	35.28	91.1627907
	Multifase síncrono	41.4	38.81	93.74396135
Físico	Monofase asíncrono	28.08	22.34	79.55840456
	Monofase síncrono	31.31	26.1	83.3599489
	Multifase asíncrono	29.63	24.94	84.17144786
	Multifase síncrono	33.66	31.47	93.49376114
Teórico	Monofase asíncrono	36	30.15	83.75
	Monofase síncrono	36	30.22	83.94444444
	Multifase asíncrono	36	29.34	81.5
	Multifase síncrono	36	31.71	88.08333333

CAPÍTULO 5

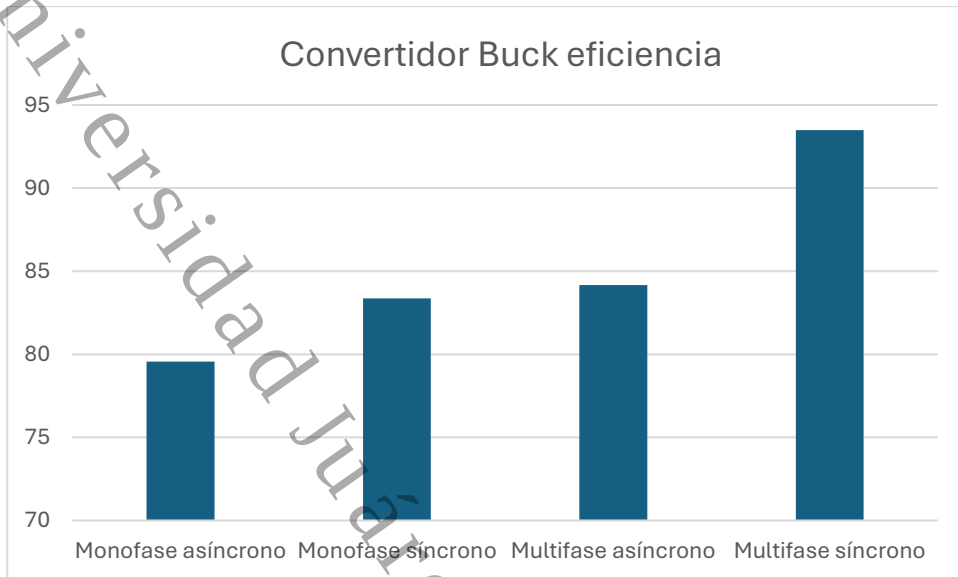
5. Discusión

En la sección de simulaciones de los cuatro casos analizados, se observa que la implementación de múltiples etapas con pulsos desfasados en el convertidor divide la corriente entre el número de fases y reduce el rizo de corriente que le llega a la carga en comparación con una topología monofase. Además, la rectificación síncrona se muestra superior a la rectificación asíncrona (diodo), causando menos pérdidas de potencia y mejorando la eficiencia del convertidor.

En la implementación física, la potencia de entrada y potencia de salida es menor en comparación con las simulaciones, sin embargo, en cuestiones de eficiencia se comportan de manera similar siendo que la topología multifase es superior a la topología monofase, al igual que la rectificación síncrona es superior a la rectificación asíncrona en cuestión de variables eléctricas.

En la Figura 5.1 se muestra una gráfica comparativa sobre las eficiencias de los convertidores en el caso de la implementación física, donde el convertidor monofase asíncrono fue el que mostró una menor eficiencia mientras que el convertidor multifase síncrono mostró la mayor eficiencia, de igual manera mencionar que en cuestiones de eficiencia el convertidor monofase síncrono y el multifase asíncrono se comportaron de manera similar.

Figura 5.1. Gráfica comparativa de eficiencias de los convertidores Buck en implementación física



En la sección de pérdidas de potencia en los interruptores, se observa que los interruptores no controlados (diodos) generan mayores pérdidas de potencia que los interruptores controlados (MOSFET), esto debido a las características de los componentes como lo son la caída de voltaje en directa en el diodo y la resistencia parasita del MOSFET.

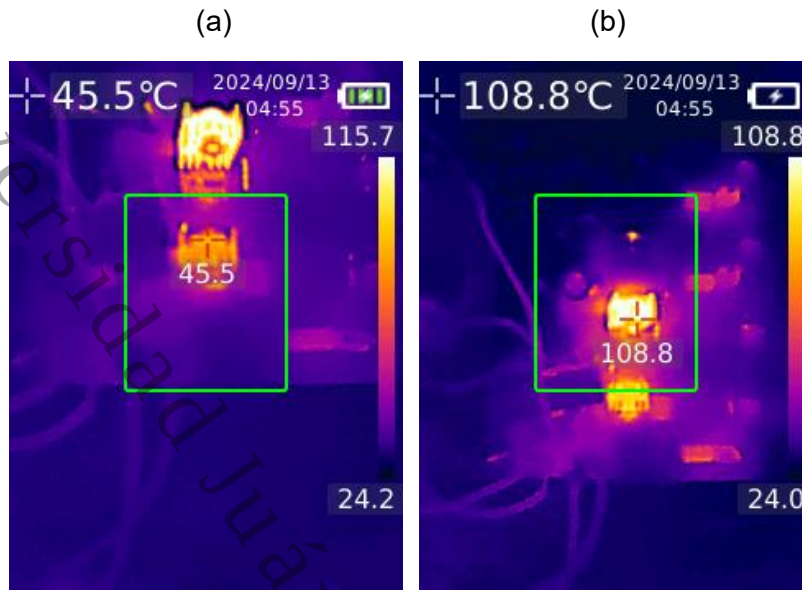
5.1. Disipación térmica en los componentes

Para verificar y detectar que componente disipa mayor potencia en el convertidor, se realizaron capturas con una cámara termográfica modelo UNIT-T

Convertidor Buck monofase asíncrono

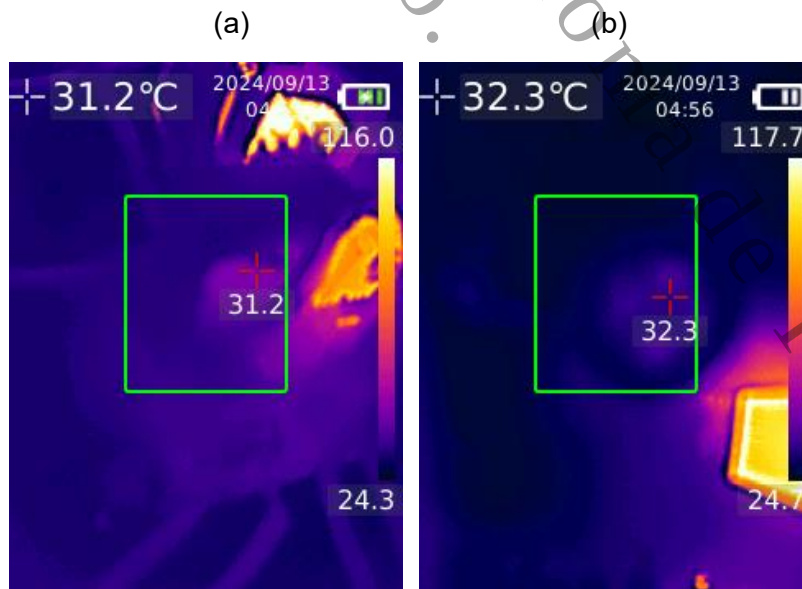
En la Figura 5.2 a), se muestra que la temperatura del interruptor superior S , donde es de 45.5°C , mientras que en la Figura 8.1 b), se observa el interruptor inferior D (diodo), donde su temperatura es de 108.8°C

Figura 5.2. (a) Temperatura del interruptor S (b) temperatura del interruptor D



Las mediciones de temperatura para el filtro LC, solo fueron realizadas en el caso 1 (convertidor Buck monofase asíncrono) y el caso 4 (convertidor Buck multifase síncrono). En la Figura 5.3 a) se presenta la medición realizada al inductor del convertidor siendo de 31.2 °C, mientras que en la Figura 5.3 b) la medición del capacitor del convertidor, siendo de 32.3 °C.

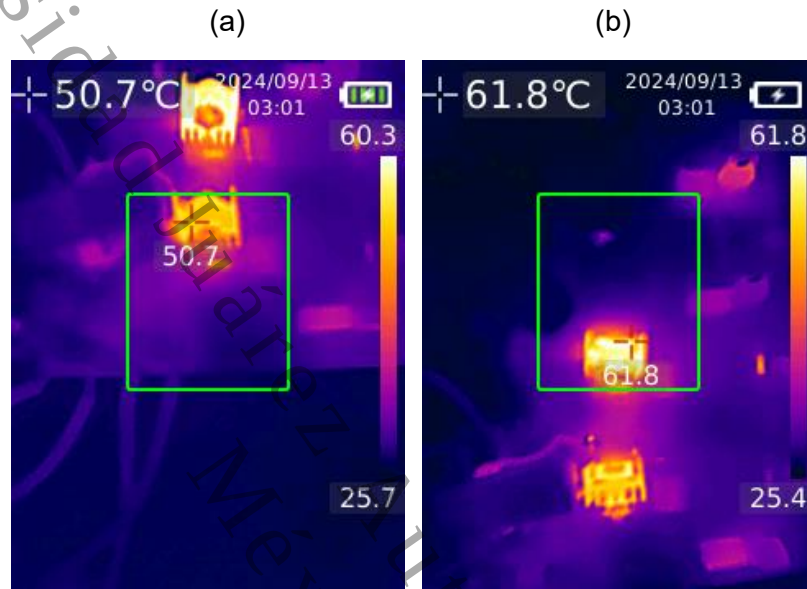
Figura 5.3. (a) Temperatura del inductor L (b) temperatura del capacitor C



Convertidor Buck monofase síncrono

En la Figura 5.4 a), se muestra que la temperatura del interruptor superior S_1 es de 50.7 °C, mientras que en la Figura 5.4b), se observa el interruptor inferior S_2 , donde su temperatura es de 61.8 °C

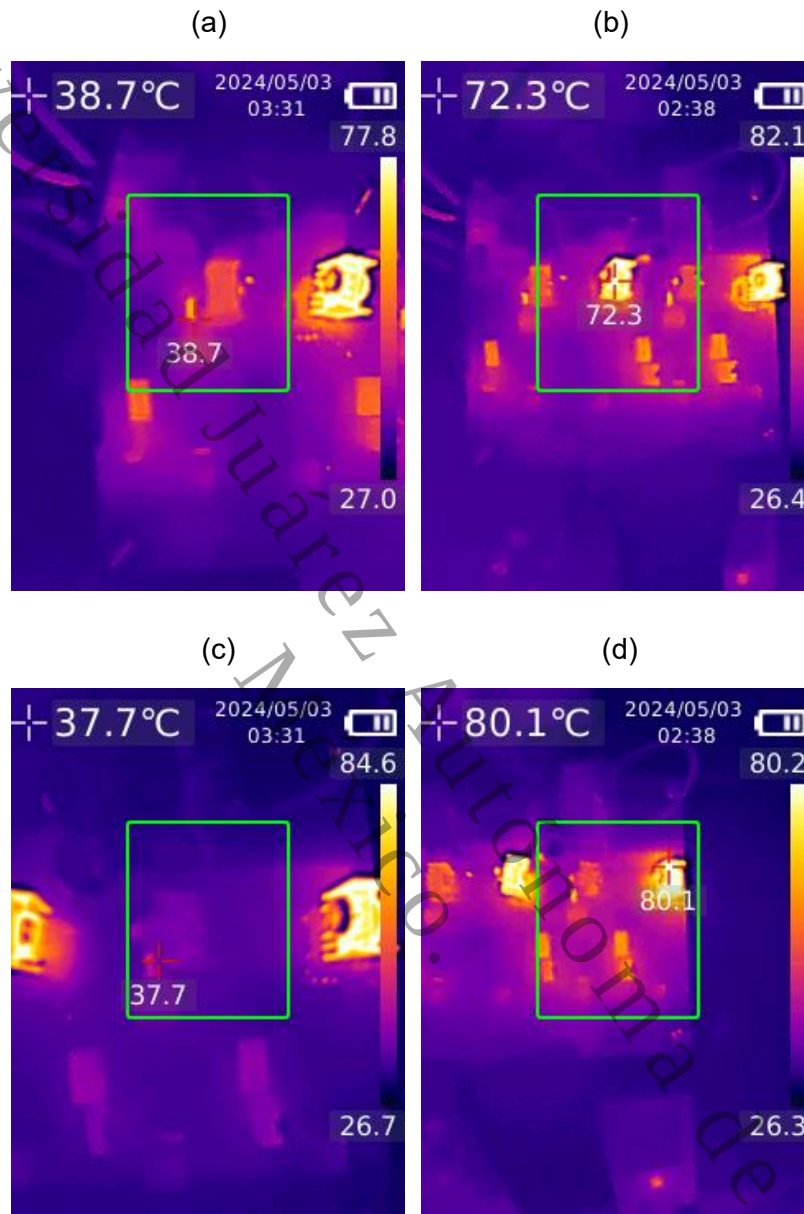
Figura 5.4. (a) Temperatura del interruptor S_1 (b) temperatura del interruptor S_2



Convertidor Buck multifase asíncrono

En la Figura 5.5 a), se observa que la temperatura del interruptor superior S_1 es de 38.7 °C, la Figura 5.5 b), muestra el interruptor inferior D_1 , donde su temperatura es de 72.3 °C, la Figura 5.5 c), presenta la temperatura del interruptor superior S_2 de 37.7 °C y la Figura 5.5 d), ilustra la temperatura del interruptor inferior D_2 de 80.1 °C.

Figura 5.5. (a) Temperatura del interruptor S_1 (b) temperatura del interruptor D_1 (c) temperatura del interruptor S_2 (d) temperatura del interruptor D_2

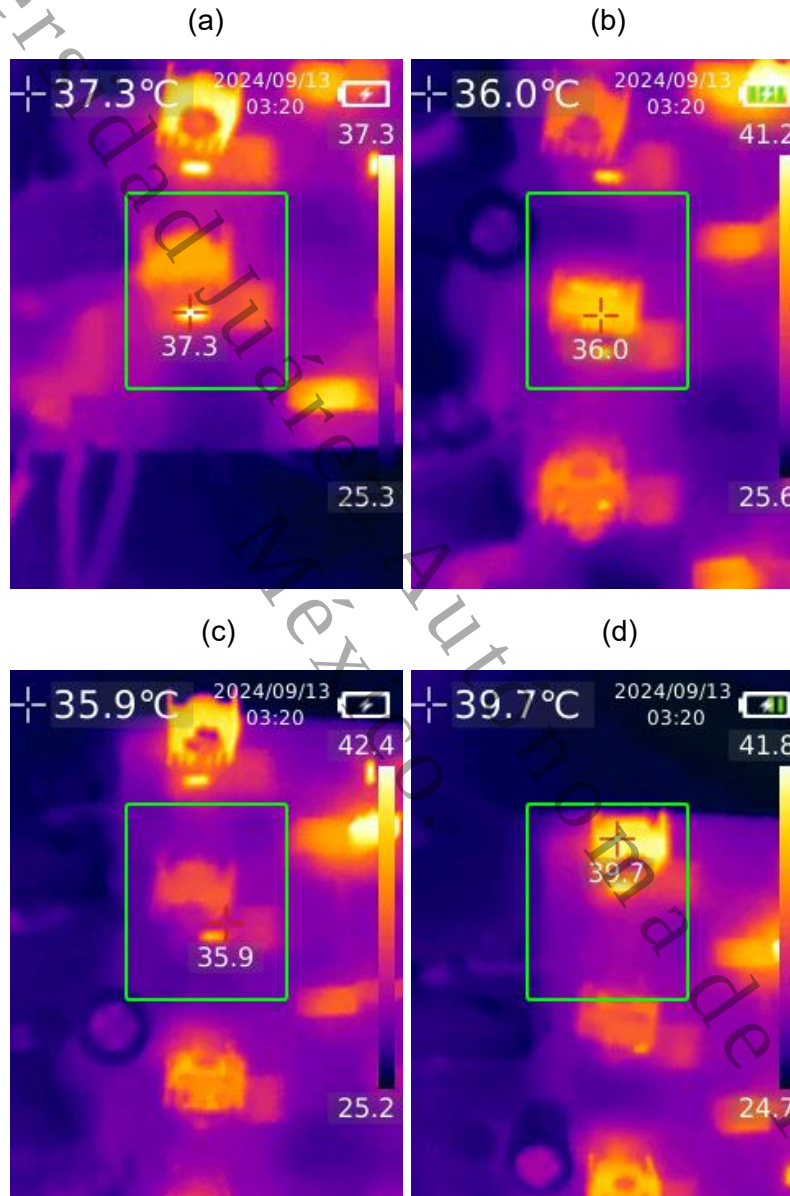


Convertidor Buck multifase síncrono

En la Figura 5.6 a), se observa que la temperatura del interruptor superior S_1 es de 37.3 °C, la Figura 5.6 b), muestra el interruptor inferior S_2 , donde su temperatura es de 36 °C, la Figura 5.6 c), presenta la temperatura del interruptor

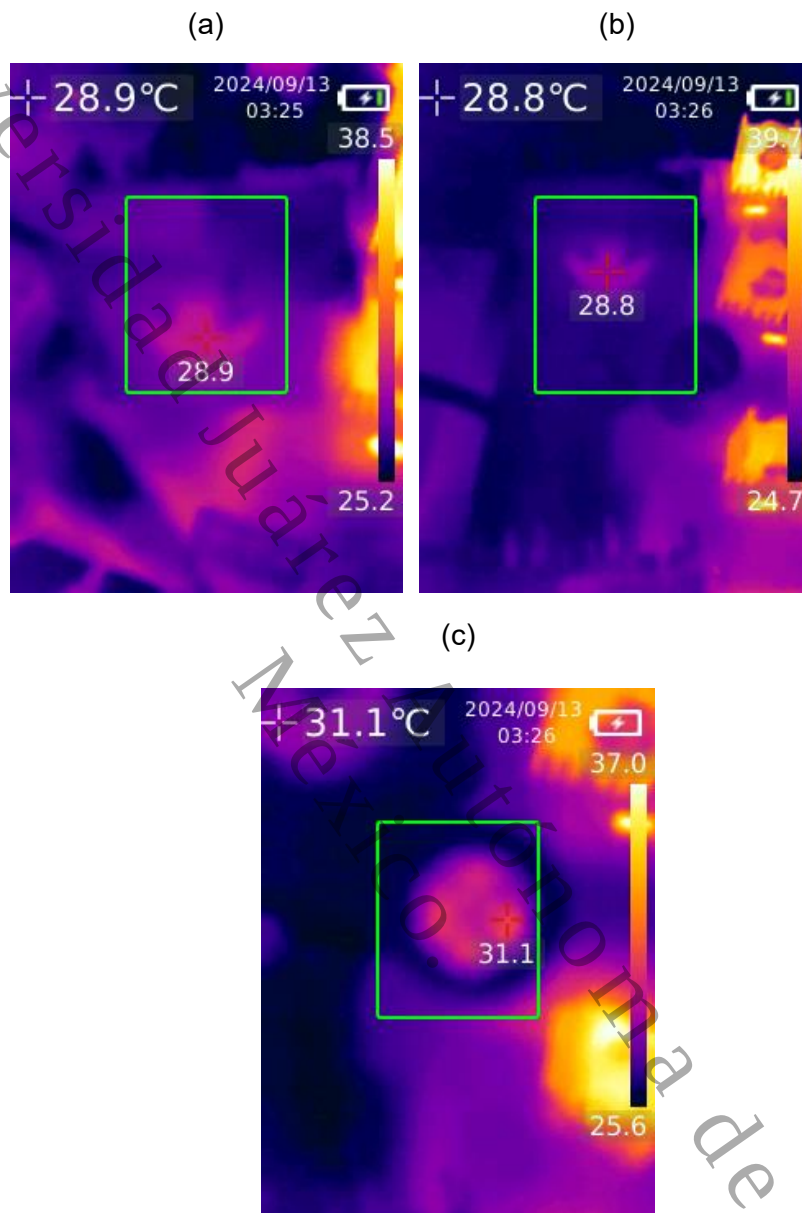
superior S_3 de 35.9 °C y la Figura 5.6 d), ilustra la temperatura del interruptor inferior S_4 de 39.7 °C.

Figura 5.6. (a) Temperatura del interruptor S_1 (b) temperatura del interruptor S_2 (c) temperatura del interruptor S_3 (d) temperatura del interruptor S_4



En la Figura 5.7 a) se presenta la medición realizada al inductor L_1 del convertidor siendo de 28.9 °C, y la Figura 5.7 b) muestra la temperatura de inductor L_2 de 28.8 °C, mientras que en la Figura 5.7 c) se ilustra la medición del capacitor del convertidor, siendo de 31.1 °C.

Figura 5.7. (a) Temperatura del capacitor del convertidor (b) temperatura del inductor L_1 (c) temperatura del inductor L_2



Por último, en la sección de mediciones de temperatura, se visualizó que los dispositivos del convertidor que mostraron mayor estrés térmico son los interruptores del convertidor, el interruptor no controlado (diodo) es el dispositivo que alcanza mayor temperatura en su topología monofase, mientras que interruptor controlado (MOSFET) alcanza la menor temperatura en su topología multifase. Las temperaturas de los interruptores están ampliamente relacionadas con las pérdidas de potencia, es decir que el dispositivo que tenga mayor pérdida de potencia será el que sufrirá mayor estrés térmico, así como se observa en la tabla 5.1.

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de las mediciones de temperatura de los interruptores.

Tabla 5.1. Mediciones de temperatura				
Párametros	Monofase asíncrono	Monofase síncrono	Multifase asíncrono	Multifase síncrono
Interruptor Superior (°C)	45.5	50.7	S1 38.7	S1 37.3
			S2 37.7	S3 35.9
Interruptor Inferior (°C)	108.8	61.8	D1 72.3	S2 36
			D2 80.1	S4 39.7

CAPÍTULO 6

6. Conclusiones y recomendaciones

Los convertidores conmutados son topologías de electrónica de potencia, cuya finalidad es adaptar a la naturaleza de la energía eléctrica a las necesidades de la carga, en el caso que la tensión a la salida sea menor que la proporcionada por la fuente se le conoce como convertidor Buck. El dispositivo tiene diversas aplicaciones como lo son cargadores de baterías o alimentación de energía para computadoras.

Se analizó el comportamiento de las variables eléctricas y eficiencia del convertidor Buck en modo de conducción continuo, en cuatro casos de estudio. Los objetivos generales y específicos se cumplieron.

Con la elaboración de este trabajo se concluye que de los cuatro casos de estudio del convertidor Buck en MCC, el caso del convertidor Buck multifase con rectificación síncrona es el que muestra valores más altos de eficiencia en el convertidor, mientras que el caso del convertidor Buck monofase con rectificación asíncrona muestra los valores más bajos de eficiencia.

Existen diversos factores que influyen en las pérdidas de potencia de los convertidores, como lo son; los componentes parásitos de los interruptores, el omitir los tiempos muertos en la rectificación síncrona, un inadecuado desfase entre etapas en la topología multifase y una mala selección de componentes.

En caso de implementar un convertidor Buck en MCC en alguna aplicación, la topología monofase con rectificación asíncrona sería una opción obsoleta, debido a su baja eficiencia y al estrés térmico de los componentes, por lo cual se tendría que buscar la manera de disipar el calentamiento de los dispositivos.

Uno de los mayores retos del trabajo fue la generación de pulsos de disparo, debido a que el FPGA SPARTAN A3 cuenta con un reloj 50 MHz, se tuvo que adaptar el pulso para cuatro interruptores, donde los interruptores superiores se encontrarían desfasados 180° y los interruptores inferiores serían complementarios, por lo cual se optó por realizar un arreglo de contadores y comparadores para cada interruptor.

Una de las recomendaciones que se proponen para futuros trabajos es el de separar la etapa de potencia y la etapa de pulsos de disparo en PCB distintas, lo cual podría reducir el ruido que mostrado en el voltaje y corriente de salida como el que se observa en la figura 4.34, al igual que la implementación de una red de snubber con la finalidad de reducir los rizados mostrados en la figura 4.30, la implementación de estas recomendaciones podría mejorar la eficiencia de los convertidores.

De igual manera se propone adaptar la placa PCB con fines educativos, de manera que los estudiantes de las asignaturas relacionadas con electrónica de potencia y eficiencia energética de los programas educativos de eléctrica, electrónica y afines puedan hacer uso de ella e interactuar con la toma de mediciones de los cuatro casos del convertidor Buck.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- By ALLDATASHEETCOM, P. (1998). *MIC4421 MICREL* | *Alldatasheet*.
- By ALLDATASHEETCOM, P. (2021). *IRF530_17 VISHAY* | *Alldatasheet*.
www.vishay.com
- Enríquez Edwin Fabricio. (2018). *Análisis y estudio de la eficiencia del convertidor Buck síncrono bajo diferentes técnicas de Gate Driver y Red snubber*. Escuela Politécnica Nacional.
- Estrada Velásquez, D., Académico, P., Peláez, J., & Docente, R. (2015). *Construcción de un convertidor Buck síncrono*. Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Garcia Maria Pilar. (2015). *Diseño e implementación de un convertidor multifase entrelazado con control en modo de deslizamiento*. Universitat Politècnica de catalunya.
- Ghani, A. F. A., Poad, M. H., Bakar, A. A., Norazman, S. N., & Amran, M. A. N. (2022). Power losses analysis of multiphase DC-DC buck converter using OrCAD PSpice software. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(3), 1723–1734. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i3.3851>
- Hart Daniel W. (2001). *Electrónica de Potencia* (Pearson educacion S.A). Pearson Educacion.
- Klein Jon. (2014). *AN-6005 Synchronous buck MOSFET loss calculations with Excel model*. www.fairchildsemi.com
- Pacheco Arnoldo. (2007). Análisis de Pérdidas del Convertidor Buck Síncrono para Aplicaciones Móviles. In *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Rohm CO, & LTD. (2016). *Application Note Switching Regulator IC Series Efficiency of Buck Converter*.
- Sierra Florencio Tutor, Á., & Garcerá Sanfeliú, G. (2018). *Cálculo y simulación de la etapa de potencia de un convertidor de continua a continua reductor (DC-DC Buck) de 3.2kW para la carga de baterías estacionarias*.
- Verde, G., Aguilar, C., Aguayo, J., De, S., & Aldaco, L. (2021). *Comparación de la corriente de salida del convertidor Buck 1 vs 5 fases Multilevel inverters View project*. <https://www.researchgate.net/publication/363315804>
- Vilchis Juan Carlos. (2009). *Análisis de Estructuras Multifase para Mejorar la Eficiencia en Convertidores Buck síncronos para la Tecnología LPIA-INTEL*.
- Zachirah Peterson. (2023). Que es un PCB de circuito impreso. *Altium Designer*. •

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	COMPARATIVA DE TOPOLOGÍAS DEL CONVERTIDOR BUCK EN MODO DE CONDUCCIÓN CONTINUO
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Jesús Rodrigo Vargas Olán
ORCID:	0009-0000-3630-4848
Resumen de la Tesis:	En este trabajo se presenta una comparativa por medio de simulaciones e implementación física del comportamiento del convertidor Buck en modo de conducción continuo en cuatro casos de estudio, topología monofase con rectificación asíncrona y síncrona, así como multifase en rectificación asíncrona y síncrona. El estudio consiste en analizar las diferentes variables eléctricas de cada topología (voltaje de entrada, corriente de entrada, voltaje de salida, corriente de salida y eficiencia del convertidor). Los resultados del análisis mostraron que la topología multifase es más eficiente que la monofase, debido a la división de corriente entre etapas del convertidor y que la rectificación síncrona es más eficiente que la asíncrona, ya que en la rectificación síncrona existen menos pérdidas de potencia y menor estrés térmico entre componentes.

Palabras claves de la Tesis:	Buck, asíncrona, síncrona, monofase y multifase.
Referencias citadas:	• By ALLDATASHEETCOM, P. (1998). MIC4421 MICREL Alldatasheet. • By ALLDATASHEETCOM, P. (2021). IRF530_17 VISHAY Alldatasheet. www.vishay.com • Enríquez Edwin Fabricio. (2018). Análisis y estudio de la eficiencia del convertidor Buck síncrono bajo diferentes técnicas de Gate Driver y Red snubber. Escuela Politécnica Nacional. • Estrada Velásquez, D., Académico, P., Peláez, J., & Docente, R. (2015). Construcción de un convertidor Buck síncrono. Instituto Tecnológico Metropolitano. • Garcia Maria Pilar. (2015). Diseño e implementación de un convertidor multifase entrelazado con control en modo de deslizamiento. Universitat Politècnica de catalunya. • Ghani, A. F. A., Poad, M. H., Bakar, A. A., Norazman, S. N., & Amran, M. A. N. (2022). Power losses analysis of multiphase DC-DC buck converter using OrCAD PSpice software. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 11(3), 1723–1734. https://doi.org/10.11591/eei.v11i3.3851 • Hart Daniel W. (2001). Electrónica de Potencia (Pearson educación S.A). Pearson Educacion. • Klein Jon. (2014). AN-6005 Synchronous buck MOSFET loss calculations with Excel model. www.fairchildsemi.com

	• Pacheco Arnoldo. (2007). Análisis de Pérdidas del Convertidor Buck Síncrono para Aplicaciones Móviles. In Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. • Rohm CO, & LTD. (2016). Application Note Switching Regulator IC Series Efficiency of Buck Converter. • Sierra Florencio Tutor, Á., & Garcerá Sanfeliú, G. (2018). Cálculo y simulación de la etapa de potencia de un convertidor de continua a continua reductor (DC-DC Buck) de 3.2kW para la carga de baterías estacionarias. • Verde, G., Aguilar, C., Aguayo, J., De, S., & Aldaco, L. (2021). Comparación de la corriente de salida del convertidor Buck 1 vs 5 fases Multilevel inverters View project. https://www.researchgate.net/publication/363315804 • Vilchis Juan Carlos. (2009). Análisis de Estructuras Multifase para Mejorar la Eficiencia en Convertidores Buck síncronos para la Tecnología LPIA-INTEL. • Zachirah Peterson. (2023). Que es un PCB de circuito impreso. Altium Designer.
--	--