



# Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico**

## Tesis de Maestría

**Análisis y Diseño de un Convertidor CD-CD para  
Recuperación de Energía Cinética**

Presentada por  
**Ing. Iván Alfonso Reyes Portillo**

Como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica**

Director de tesis  
**Dr. Abraham Claudio Sánchez**

Codirector de tesis  
**Dr. Jesús Darío Mina Antonio**

**Cuernavaca, Morelos, México. Marzo de 2019**



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor., 11 de marzo de 2019.

OFICIO No. DIE/022/2019

**Asunto:** Aceptación de documento de tesis

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

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Iván Alfonso Reyes Portillo**, con número de control **M17CE011** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN CONVERTIDOR CD-CD PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Abraham Claudio Sánchez  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 7675050

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Jesús Darío Miña Antonio  
Doctor en Ingeniería  
Cédula profesional 6094069

REVISOR 1

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

REVISOR 2

Dr. Mario Ponce Silva  
Doctor en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica  
Cédula profesional 3516427

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

Estudiante  
Expediente  
RFEJ/lrr.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Morelos, **12/marzo/2019**

OFICIO No. SAC/122/2019

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ING. IVÁN ALFONSO REYES PORTILLO**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Análisis y diseño de un Convertidor CD-CD para Recuperación de Energía Cinética", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*

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

SEP TecNM  
CENTRO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA

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

GVGR/mcr

## Dedicatoria

A mis padres Javier y Beatriz por brindarme su apoyo incondicional no solo durante esta etapa, sino a través del transcurso de mi vida, sin ustedes amados padres jamás lo hubiera logrado. A ustedes les debo todo lo que soy, es una bendición tenerlos en mi vida, gracias por darme más allá de lo que estaba a su alcance.

A mis hermanos Gladys y Francisco por apoyarme incondicionalmente, por su confianza y por decirme las palabras adecuadas en el momento preciso para fomentar la confianza en mí. Gracias hermanos por los sacrificios y esfuerzos que realizaron para apoyar mi desarrollo profesional.

## Agradecimientos

A dios, por darme la fortaleza necesaria para seguir adelante durante este trayecto.

A mi asesor, Dr. Abraham Claudio Sánchez por el apoyo incondicional que recibí de su parte, por su comprensión, paciencia, consejos y conocimientos brindados para el desarrollo de este trabajo de tesis, así como mi desarrollo profesional.

Al Dr. Jesús Darío Mina Antonio co-director de este proyecto de tesis por la disponibilidad de sus conocimientos, asesorías y comentarios, los cuales fueron muy importantes para esta tesis.

A los integrantes de este comité de revisión de este trabajo de tesis, Dr. Mario Ponce Silva y Dr. Carlos Aguilar Castillo por sus comentarios, aportaciones y sugerencias las cuales contribuyeron a la mejora de este trabajo de tesis.

A todos mis amigos y compañeros de generación que hice a lo largo de mi formación, por todas las experiencias que disfrutamos juntos.

Un agradecimiento especial a la Lic. Lorena Ruiz Ramírez por todo su apoyo brindado en el transcurso de mi estancia en cenidet.

A cenidet por brindarme todos los recursos necesarios para mi desarrollo académico, profesional y personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), el cual proporcionó los recursos económicos para el desarrollo de este proyecto de tesis.

# **Resumen**

En México el consumo energético en el sector industrial está en aumento. La industria desde hace años se ha involucrado en planes de ahorro y eficiencia. La electrónica de potencia ha propuesto múltiples soluciones, sin embargo, estas implican grandes inversiones económicas, como es el caso de instalaciones de parques eólicos o plantas fotovoltaicas. Esta problemática se puede remediar por medio de sistemas de recuperación de energía, los cuales pueden recolectar alguna forma de energía (cinética, magnética, hidráulica, térmica, estática entre otras) de algún proceso industrial para su uso inmediato o almacenarla para uso posterior. El proceso para recuperar dicha energía es mediante un sistema o algún dispositivo que la transforma en energía eléctrica. Este trabajo de tesis tiene como objetivo analizar y diseñar un convertidor CD-CD para un sistema de recuperación energía cinética que se implementará en el sector industrial automotriz, lo que permitirá un ahorro energético y económico significativo en sus procesos de producción.

# **Abstract**

In Mexico, energy consumption in the industrial sector is on the rise. For years, industry has been involved in saving and efficiency plans. Power electronics has proposed multiple solutions, however, these involve large economic investments, such as wind farm installations or photovoltaic plants. This problem can be remedied by means of energy recovery systems, which can collect some form of energy (kinetic, magnetic, hydraulic, thermal, static, among others) from some industrial process for immediate use or store it for later use. The process to recover this energy is by means of a system or some device that transforms it into electrical energy. This thesis work aims to analyze and design a DC-DC converter for a kinetic energy recovery system to be implemented in the automotive industry, which will allow considerable energy and economic savings in production processes.

# Contenido

Listado de figuras.....	III
Listado de tablas.....	V
Lista de acrónimos .....	VI
Nomenclatura .....	VII
<b>Capítulo 1</b> Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Uso de energía en el sector industrial automotriz .....	3
1.3 Pruebas en automóviles para estándares de calidad .....	4
1.4 Planteamiento del problema .....	4
1.5 Objetivos .....	5
1.5.1 Objetivo general .....	5
1.5.2 Objetivos particulares.....	5
1.6 Alcances .....	5
1.7 Metodología .....	5
<b>Capítulo 2</b> Revisión del estado del arte.....	6
2.1 Sistemas de recuperación de energía cinética en diferentes aplicaciones .....	7
2.1.1 Recuperación de energía en puertas giratorias .....	7
2.1.2 Recuperación de energía en discotecas .....	8
2.1.3 Recuperación de energía en mochilas .....	8
2.1.4 Recuperación de energía en bicicletas.....	9
2.1.5 Análisis energético de los diferentes SIREC.....	10
2.2 Sistemas de almacenamiento de energía .....	10
2.2.1 Baterías.....	11
2.2.1.1 Diferentes tecnologías .....	11
2.2.2 Volantes de inercia .....	12
2.3 Convertidores CD-CD analizados afines al proyecto.....	14
2.4 Conclusiones del estado del arte .....	18
<b>Capítulo 3</b> Dimensionamiento y manejo de energía en el SIREC .....	20
3.1 SIREC basado en un volante de inercia .....	21
3.2 Pruebas a vehículos en los rodillos de aceleración y desaceleración .....	21
3.3 Selección del generador para el SIREC .....	22
3.3.1 Características eléctricas .....	23
3.4 Diseño y dimensionamiento del volante de inercia.....	25
3.5 Modelo matemático del SIREC.....	28
3.5.1 Simulación del SIREC a velocidad nominal .....	31
3.6 Manejo de energía en el SIREC .....	31
3.7 Conclusiones energéticas del SIREC. ....	33
<b>Capítulo 4</b> Análisis y diseño de la topología Buck multifase .....	34
4.1 Convertidor Buck multifase .....	35
4.1.1 Características del convertidor Buck multifase asíncrono .....	35
4.2 Análisis del convertidor de cuatro fases.....	38
4.3 Análisis de corrientes por fases .....	41

4.4 Ecuaciones de diseño del convertidor Buck multifase .....	44
4.5 Parámetros del diseño.....	46
4.5.1 Frecuencia de conmutación .....	46
4.5.2 Número de fases.....	47
4.5.3 Conclusiones de diseño del convertidor CD-CD .....	48
4.6 Selección de componentes para el convertidor CD-CD .....	48
4.7 Diseño del convertidor considerando elementos parásitos en simulación .....	50
4.7.1 Simulación.....	51
4.7.2 Simulación del convertidor con dispositivos reales .....	51
4.7.3 Validación del diseño .....	55
4.7.4 Análisis de eficiencia teórica en base a simulación .....	56
<b>Capítulo 5</b> Implementación y resultados experimentales.....	58
5.1 Prototipo.....	59
5.2 Definición de Protocolo de pruebas .....	60
5.3 Pruebas por realizar .....	63
5.3.1 Pruebas al integrado ISL6558 e impulsores .....	63
5.3.2 Pruebas de funcionalidad del convertidor .....	65
5.3.3 Pruebas de ecualización de corrientes por fase .....	65
5.3.4 Pruebas típicas de eficiencia .....	67
5.3.5 Pruebas en diferentes condiciones de SIREC.....	68
5.3.6 Análisis de eficiencia en diferentes etapas de operación del SIREC .....	69
5.3.7 Pruebas y análisis de temperatura en dispositivos discretos .....	71
<b>Capítulo 6</b> Conclusiones y trabajos futuros .....	74
6.1 Conclusiones .....	75
6.2 Otros logros.....	75
6.3 Dificultades en el trascurso del proyecto .....	76
6.4 Trabajos futuros .....	76
Referencias.....	77
Anexo 1. Metodologías de variable de estados promediados .....	81
Anexo 2. Cálculos de parámetros de diseño del convertidor Buck multifase.....	86
Anexo 3. Diseño de PCB's.....	87
Anexo 4. Participación en el CIEP 2018.....	88

# Listado de figuras

---

Figura 1. Pruebas de aceleración y desaceleración dentro de la industria automotriz. ....	4
Figura 2. Recuperación de energía en puertas giratorias.....	7
Figura 3. Recuperación de energía en discoteca a través del baile. ....	8
Figura 4. Recuperación de energía en una mochila.....	9
Figura 5. Recuperación de energía en una bicicleta a) prototipo y b) perfil de potencia .....	10
Figura 6. Comparación de la densidad de potencia en función de la densidad de energía entre volantes, motores de combustión interna, baterías y células de combustión. ....	13
Figura 7.a) Topología Buck y b) eficiencia en comparación con la corriente de salida.....	14
Figura 8. a) Topología Buck cuadrático y b) eficiencia del convertidor Buck cuadrático vs potencia de salida.....	15
Figura 9. a) Topología buck-boost y b) eficiencia del convertidor Buck-Boost con conmutación suave vs el convertidor Buck-Boost convencional.....	16
Figura 10.a) Topología Flyback y b) eficiencia del convertidor Flyback vs potencia de salida. ....	16
Figura 11.a) Topología Buck multifase y b) eficiencia del convertidor Buck multifase. ....	17
Figura 12. Influencia del ciclo de trabajo en la cancelación del rizo de corriente .....	17
Figura 13. SIREC basado en un volante de inercia para aplicación en la industria automotriz.....	21
Figura 14. Generador cd de imanes permanentes.....	23
Figura 15. Modelo eléctrico del Generador de CD de imanes permanentes. ....	24
Figura 16. Pruebas para determinar la inductancia de armadura.....	25
Figura 17.a) Diseño del volante de inercia para el SIREC, b) diseño con mayor momento de inercia, c) diseño con menor momento de inercia. ....	27
Figura 18. Modelo electromecánico del sistema de recuperación de energía. ....	28
Figura 19. Simulación del generador en diferentes condiciones de velocidad.....	31
Figura 20. Esquemático del SIREC.....	32
Figura 21. Manejo de energía del SIREC. ....	32
Figura 22. Topología del convertidor Buck multifase asíncrono. ....	35
Figura 23. Convertidor multifase asíncrono a) señales de control y b) topología.....	36
Figura 24.Gráfica de factor de cancelación de rizo en la salida. ....	37
Figura 25.Aumento de frecuencia de rizo. ....	37
Figura 26. Factor de cancelación de rizo en la entrada. ....	38
Figura 27.Convertidor Buck de cuatro fases. ....	39
Figura 28.Tiempos de encendidos de los MOSFET's.....	40
Figura 29. Comportamiento del $R_{DS(on)}$ del MOSFET 20N60CFD.....	42
Figura 30.Desequilibrio de corrientes por fase a) variando D y resistencias iguales y b) variando $R_{DS(on)}$ con iguales ciclos de trabajo. ....	43
Figura 31.Desequilibrio de corriente en cada fase sumando los diferentes efectos de la $R_{DS(on)}$ y los ciclos de trabajo.....	43
Figura 32.Corrientes ecualizadas variando el ciclo de trabajo. ....	44
Figura 33. Selección de número de fases para el convertidor multifase. ....	47
Figura 34. Topología Buck multifase de 4 fases seleccionado para el SIREC. ....	48
Figura 35. Diseño de topología considerando elementos parásitos en OrCAD Pspice.....	50
Figura 36. Modulación PWM de la topología multifase en OrCAD Pspice. ....	52

Figura 37. Voltaje de salida del convertidor multifase. ....	52
Figura 38. Rizo de voltaje de salida del convertidor multifase. ....	52
Figura 39. Corriente de salida del convertidor multifase. ....	53
Figura 40. Rizo de corriente de salida del convertidor multifase. ....	53
Figura 41. Corriente pulsante en la entrada del convertidor Buck 4 fases y Buck convencional. ...	54
Figura 42. Rizo de Corriente en cada fase del convertidor. ....	54
Figura 43. Manejo de corriente en cada MOSFET. ....	55
Figura 44. Manejo de corriente en cada Diodo. ....	55
Figura 45. Pérdidas de las topologías en el simulador OrCAD Pspice a) Buck cuatro fases y b) Buck convencional. ....	57
Figura 46. Esquema de implementación del convertidor. ....	59
Figura 47. Implementación del convertidor. ....	59
Figura 48. Diagrama del SIREC con la conexión del Buck multifase. ....	60
Figura 49. Puntos de pruebas en el convertidor. ....	63
Figura 50. Conexión del circuito ISL6458. ....	64
Figura 51. Revisión de pulsos de conmutación del control ISL6558. ....	64
Figura 52. a) Variación del ciclo de trabajo individual ante perturbaciones de voltaje en los sensores de ecualización. ....	65
Figura 53. Funcionamiento del convertidor en diferentes condiciones. ....	65
Figura 54. Corrientes desecualizadas. ....	66
Figura 55. Corrientes en cada fase después de activar el lazo de ecualización. ....	67
Figura 56. Análisis de eficiencia del convertidor a potencia nominal. ....	68
Figura 57. Técnica de corriente constante – voltaje constante para cargar baterías. ....	68
Figura 58. Eficiencia del SIREC en diferentes etapas de operación. ....	69
Figura 59. Esquema de operación del SIREC. ....	70
Figura 60. Espectro de temperatura en el convertidor sin ecualización de corrientes. ....	71
Figura 61. Espectros de temperatura con el lazo de ecualización. ....	72
Figura 62. Tendencia de temperatura ante diferentes condiciones de ecualización en los MOSFET's a) corrientes desecualizadas y b) corrientes ecualizadas. ....	72
Figura 63. Tendencia de temperatura ante diferentes condiciones de ecualización en los Diodos a) corrientes desecualizadas y b) corrientes ecualizadas. ....	73

# Listado de tablas

---

Tabla 1. Precio al público de productos refinados (pesos por litro a precios).....	3
Tabla 2. Precio medio facturado por tarifa del Sistema Eléctrico Nacional (pesos por kW-h).....	3
Tabla 3. Análisis energético de los diferentes SIREC.....	10
Tabla 4. Características de las diferentes tecnologías en baterías. ....	12
Tabla 5. Parámetros de comparación para las topologías estudiadas.....	18
Tabla 6. Simulación de topologías estudiadas en el estado del arte.....	19
Tabla 7. Condiciones de velocidad en pruebas a vehículos. ....	22
Tabla 8. Pruebas a la parte electromecánica del sistema.....	22
Tabla 9. Especificaciones del generador de cd.....	23
Tabla 10. Pruebas a rotor bloqueado para cálculo de la resistencia serie.....	24
Tabla 11. Cálculos de diseño de un volante tipo tambor con diferentes capacidades de almacenamiento de energía. ....	27
Tabla 12. Comparación de resultados de simulación comparado con valores experimentales. ....	31
Tabla 13. Selección de frecuencia e inductor para el convertidor multifase.....	46
Tabla 14. Ciclos de trabajos en diferentes condiciones de entrada del convertidor.....	47
Tabla 15. Parámetros de implementación para la topología multifase.....	48
Tabla 16. Dispositivos seleccionados y sus características.....	49
Tabla 17. Elementos parásitos.....	50
Tabla 18. Parámetros de diseño del convertidor multifase.....	51
Tabla 19. Comparación entre los valores calculados y valores obtenidos en el simulador.....	56
Tabla 20. Variación de parámetros principales y valores nominales.....	60
Tabla 21. Variación de parámetros secundarios.....	61
Tabla 22. Equipo requerido para realizar diferentes pruebas.....	61
Tabla 23. Descripción del protocolo de pruebas. ....	62
Tabla 24. Comparación de corrientes desecualizadas. ....	66
Tabla 25. Comparación de corrientes ecualizadas. ....	67
Tabla 26. Condiciones de operación del SIREC a las que se sometió el convertidor.....	69
Tabla 27. Eficiencia del SIREC en cada etapa de operación. ....	70

# Lista de acrónimos

---

SIREC	Sistema de Recuperación de Energía Cinética
FN	Frontera Norte
RP	Resto del País
LP	Licuado a Presión
O-M	Tarifa Ordinaria menor a 100kW
H-M	Tarifa de servicio general en media tensión mayor a 100kW
H-S	Tarifa en alta tensión
H-SLF	Tarifa con cargos fijos
CD-CD	Corriente Directa-Corriente Directa
PWM	Modulación de Ancho de Pulso
MOSFET	Transistor de Efecto de Campo de Semiconductor Óxido-Metal
MCC	Modo de Conducción Continua
LCR	Inductancia-Capacitancia-Resistencia
HP	Caballo de fuerza
UPS	Sistemas de alimentación ininterrumpida
A	Amperes
W	Watts
V	Volts
$\Omega$	Ohms

# Nomenclatura

---

$I_{in}$	Corriente de entrada
$I_o$	Corriente de salida
$V_{in}$	Voltaje de entrada
$V_o$	Voltaje de salida
$P_{in}$	Potencia de entrada
$P_o$	Potencia de salida
$R_t$	Relación de transmisión
$J_m$	Momento de inercia del volante
$V_G$	Voltaje de generador
$\omega_{rod}$	Velocidad de rodillos
$\omega_g$	Velocidad del generador
$T_P$	Tiempo de pruebas en vehículos
$E_P$	Energía producida durante pruebas a vehículos
$L_a$	Inductancia de armadura
$R_a$	Resistencia de armadura
$E_v$	Energía cinética del volante
$\omega_{max}$	Velocidad máxima de operación del volante
$\omega_{min}$	Velocidad mínima de operación del volante
$m$	Masa
$v$	Volumen
$\rho$	Densidad
$N_1$	Piñón mayor
$N_2$	Piñón menor
$T_L$	Torque del rodillo
$T_c$	Torque en la salida de la transmisión unidireccional
$\theta$	Velocidad impuesta por los rodillos
$\phi$	Velocidad impuesta por la transmisión unidireccional

$J_L$	Momento de inercia del rodillo
$B_L$	Pérdidas por fricción en el rodillo
$B_M$	Pérdidas por fricción en el volante
$T$	Torque en la entrada al generador
$E$	Fuerza contraelectromotriz
$K_b$	Constante mecánica
$K_j$	Constante eléctrica
$I_{fase}$	Corriente por fase
$\Delta_{ILfase}$	Rizo de corriente por fase
$a\%$	Porcentaje del rizo de corriente
$b\%$	Porcentaje del rizo de voltaje
$f_{cap}$	Frecuencia de operación en capacitor
$\Delta_{vo}$	Rizo de voltaje en la salida del convertidor
$D$	Ciclo de trabajo
$L_{1,2,3,4}$	Tamaño de cada inductor por fase
$C$	Tamaño del capacitor
$\eta$	Eficiencia
$f_s$	Frecuencia de conmutación
$R_{DS(ON)}$	Resistencia en el MOSFET
$R_D$	Resistencia en diodos
$ESR$	Resistencia serie del capacitor
$R_L$	Resistencia parasita del inductor
$R_o$	Resistencia de carga en la salida
$M$	Ganancia
$P_{Multifase}$	Pérdidas en el convertidor multifase

---

# Capítulo 1

## Introducción

---

En este capítulo se presenta el panorama general del proyecto de tesis. Se tiene como objetivo dar una breve introducción al tema y presentar la importancia e interés que se tiene por el ahorro energético en el sector automotriz. A su vez expone de manera breve las diferentes problemáticas que tienen los SIREC (Sistemas de Recuperación de Energía Cinética) y se propondrá el diseño de una metodología para transferir la energía disponible a sistemas de almacenamiento.

## 1.1 Antecedentes

En México el consumo energético en el sector industrial está en aumento. La energía eléctrica es el energético que más se consume con un aproximado del 33.71% según datos en 2015 de la Secretaria de Energía (SENER). La industria desde hace años se ha involucrado en planes de ahorro y eficiencia, lo anterior a raíz de procesos de auditoría que detectaron costos energéticos de producción que se sitúan entre un 25% y un 50% del gasto total de las empresas auditadas. Cabe destacar que es en la pequeña y mediana industria, donde tradicionalmente han tenido menos penetración las acciones para mejorar la eficiencia energética, por lo que es necesario concentrar esfuerzos en este sector de la economía. En general los consumos energéticos más relevantes dentro de la industria son: iluminación con un 10%, climatización con un 25% y la maquinaria con un 65% [1].

De acuerdo con datos de la SENER, la energía que se destina a procesos industriales solo se aprovecha un 53.2%, el resto se traduce en pérdidas caloríficas, cinéticas y fugas, entre otros. Los procesos donde se observan estas pérdidas son por paros, procesos mal planeados, sistemas no automatizados que implican mayor costo energético y problemas de medición, entre otros. Sin embargo, las pérdidas de energía son muy significativas en los procesos industriales, derivadas de la energía invertida en agua, electricidad, gas, combustibles, gas en auto-elevadores, vapor y aire comprimido, lo cual no se utiliza con la mejor eficiencia en la industria. Esto incluye las pérdidas por accionamiento, pérdidas térmicas durante procesos y por tiempo muertos. Los altos costos de energéticos en México han repercutido en pérdidas económicas para el sector industrial. Debido a la gran demanda de consumo energético de este sector, se han buscado alternativas para reducir costos en la producción. La electrónica de potencia ha propuesto múltiples soluciones, sin embargo, estas implican grandes inversiones económicas, como es el caso de instalaciones de parques eólicos o plantas fotovoltaicas.

Este trabajo de tesis tiene como objetivo analizar y diseñar un sistema de recuperación energía cinética en el sector industrial automotriz, lo que permitirá a un ahorro energético y económico considerable. Esta problemática se puede remediar por medio de sistemas de recuperación de energía, los cuales pueden recolectar alguna forma de energía de algún proceso industrial para su uso inmediato o almacenarla para uso posterior [2-4].

La recuperación o cosecha de energía (a menudo también identificada por el término en inglés Energy Harvesting) es el proceso para aprovechar la energía residual (cinética, térmica, entre otros) presente en el entorno industrial. El proceso para recuperar dicha energía es mediante un sistema o algún dispositivo que la transforma en energía eléctrica [5-7].

## 1.2 Uso de energía en el sector industrial automotriz

El sector industrial automotriz se encuentra entre los mayores consumidores de energía en el país. Durante el 2017 alcanzó 17.71 petajoules de consumo energético producido en México, estos datos incluyen los hidrocarburos y otros tipos de energéticos que se producen e importan, solo en ese año. La tendencia de los precios en los energéticos tiende a aumentar, por lo que las empresas se han visto en la necesidad de hacer un uso eficiente de la energía. En la Tabla 1 se muestra la evolución de costos de los principales energéticos que se consumen en la industria y su evolución en el precio desde el 2017 al 2019.

*Tabla 1. Precio al público de productos refinados (pesos por litro a precios).*

<b>FN-Frontera norte</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
<b>RP-Resto del país</b>	<b>Pesos (M/N)</b>	<b>Pesos (M/N)</b>	<b>Pesos (M/N)</b>
<b>Pemex magna (FN)</b>	15.10	16.85	15.95
<b>Pemex Premium (FN)</b>	17.79	18.10	17.10
<b>Pemex Premium (RP)</b>	16.90	18.93	20.33
<b>Pemex magna (RP)</b>	15.99	17.10	18.89
<b>Diésel</b>	17.05	17.92	20.51
<b>Gas LP</b>	9.75	10.95	11.50

Mientras que la tarifa de energía eléctrica del 2017 al 2019 ha tenido un aumento del 40% aproximadamente en tarifas impuestas al sector industrial como se puede observar en la Tabla 2.

*Tabla 2. Precio medio facturado por tarifa del Sistema Eléctrico Nacional (pesos por kW-h)*

	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
<b>Sector empresa mediana</b>			
<b>O-M</b>	2.10	2.15	2.19
<b>H-M</b>	1.73	1.76	1.80
<b>Sector gran industria</b>			
<b>H-S</b>	1.53	1.58	1.65
<b>H-SLF</b>	1.78	1.85	1.99

Siendo el sector automotriz el que destina en gastos energéticos un aproximado de 12 mil millones de pesos incluidos la energía eléctrica y los combustibles fósiles, de ahí la importancia de hacer un uso eficiente de los energéticos y buscar alternativas para recuperar la energía residual que se pierde en diferentes procesos de manufactura [8].

### **1.3 Pruebas en automóviles para estándares de calidad**

Se definió el lugar específico donde se implementará el sistema de recuperación de energía cinética. Siendo el proceso de pruebas de aceleración y desaceleración que se le realizan a los vehículos antes de salir al mercado, donde se observó mayor oportunidad de recuperar una gran cantidad de energía cinética. En la Figura 1 se muestra el proceso de pruebas a los vehículos.



*Figura 1. Pruebas de aceleración y desaceleración dentro de la industria automotriz.*

Sin embargo, en las pruebas de desaceleración esa energía es térmica durante el frenado del vehículo; por lo tanto, se propone el desarrollo de un sistema que permita recuperar esa energía residual generada en el proceso de frenado. Lo anterior requiere que se consideren las condiciones de operación del sistema de pruebas para definir las especificaciones del diseño de sistema de recuperación.

### **1.4 Planteamiento del problema**

Los SIREC son una de las opciones viables porque en varios procesos industriales está presente la pérdida de energía a través de movimiento. Sin embargo, la generación de energía es muy variable debido a las diferentes velocidades que se manejan dentro de la industria. El problema principal del SIREC se localiza en el convertidor CD-CD que tiene que manejar entradas muy variables de voltaje y corriente para acondicionar dichas variaciones eléctricas y transferir la energía a un banco de batería en una salida constante,

donde se almacena la energía. Por lo que se buscará diseñar un convertidor capaz de manejar las densidades de potencia, la generación intermitente y además de que tenga una alta eficiencia por encima del 90%.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema de recuperación de energía cinética, basado en un convertidor CD-CD, capaz de almacenar la energía recuperada en baterías.

### **1.5.2 Objetivos particulares**

1. Análisis del sistema de recuperación en base a condiciones de entrada y las condiciones de salida requeridas para la carga de baterías.
2. Análisis y diseño de la topología a utilizar a partir de los requerimientos de eficiencia y de densidad de potencia.
3. Implementación y validación del diseño del convertidor CD-CD que cumpla con las características esperadas.
4. Validación de pruebas experimentales en las diferentes condiciones de operación del sistema de recuperación de energía.

## **1.6 Alcances**

Se desarrollará un convertidor CD-CD para un sistema de recuperación de energía de una potencia a 1kW.

## **1.7 Metodología**

Los pasos para alcanzar los objetivos de este trabajo de tesis son los siguientes:

1. Revisión y análisis del estado del arte.
2. Análisis del sistema de recuperación de energía.
3. Análisis de la topología propuesta.
4. Diseño, implementación y experimentación del convertidor.
5. Verificación de operación del convertidor cd-cd.
6. Documentación.

---

## Capítulo 2

### Revisión del estado del arte

---

Este capítulo tiene como objetivo presentar la revisión del estado de los SIREC presentados en diferentes aplicaciones. Lo que permite valorar la viabilidad, el desempeño energético y la operatividad ante las condiciones en las que se presenta dicha energía residual. A su vez, se presenta las diferentes topologías de convertidores CD-CD que tendrían la viabilidad de las condiciones de operación en la transferencia de energía, niveles de potencia, el manejo de la generación intermitente de energía y una alta eficiencia entre otros aspectos.

## 2.1 Sistemas de recuperación de energía cinética en diferentes aplicaciones

Algunos sistemas de recuperación de energía que se han desarrollado para diferentes aplicaciones y fueron analizados como base para el diseño del sistema de recuperación de energía cinética (SIREC) [9].

### 2.1.1 Recuperación de energía en puertas giratorias

Se demuestra cómo la energía empleada por usuarios, al cruzar puertas giratorias, se pueden utilizar para el aprovechamiento de la generación de energía eléctrica. Esta energía puede ser almacenada en baterías. El prototipo desarrollado produce 110 W durante el tiempo de 2 segundos que es tiempo que demora una persona en cruzar la puerta. La generación depende de la frecuencia de la gente que pasa por la puerta. También se puede optimizar el incremento de la energía generada, maximizando el esfuerzo del usuario mediante la variación de varios parámetros: anchura de la puerta, la masa de la puerta y la relación de transmisión [10-11]. Esta forma de recuperación se muestra en la Figura 2.

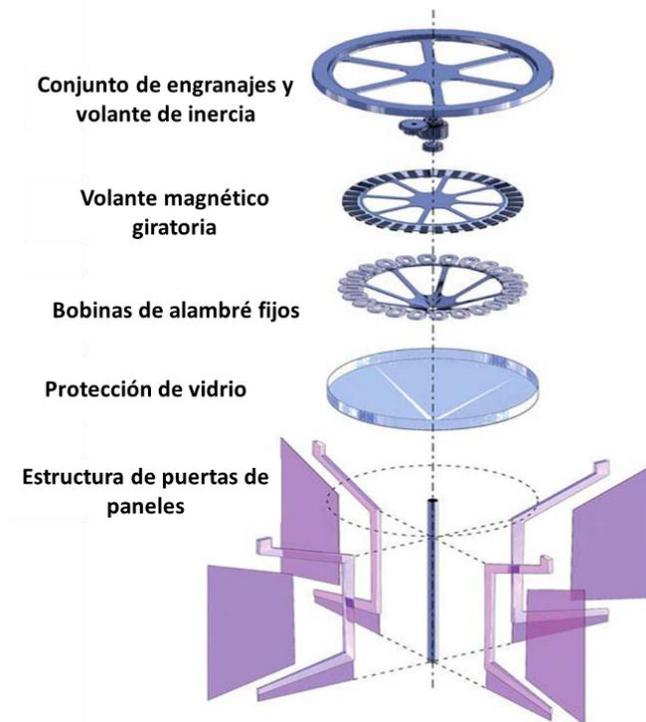


Figura 2. Recuperación de energía en puertas giratorias.

### 2.1.2 Recuperación de energía en discotecas

Se presenta la recolección de energía humana en la pista de baile de un club. Dado que las personas se encuentran bailando en una misma ubicación se diseñó e implementó un sistema para convertir el baile humano en energía eléctrica. La pista está dividida en módulos que son de  $50 \times 50 \times 8$  centímetros donde cada módulo es un SIREC individual. Cada módulo se flexiona ligeramente cuando es pisado y crea un movimiento que se transforma en energía eléctrica debido a un generador. Dicha energía se usa en la iluminación a base de lámparas LED's que se encuentran en la parte superior y alrededor de la pista de baile. Los resultados obtenidos mostraron que aproximadamente entre 20 y 30 W pueden ser generados durante un período de 10 segundos, esto depende del peso de la persona y la distancia que se esté desplazando, un ejemplo de una persona cuyo peso es de 80kg con un desplazamiento de 10 cm produce alrededor de 10 Joules. [12-13]. Esta forma de recuperación se muestra en la Figura 3.

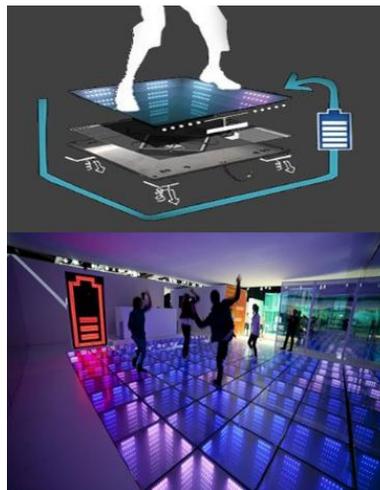
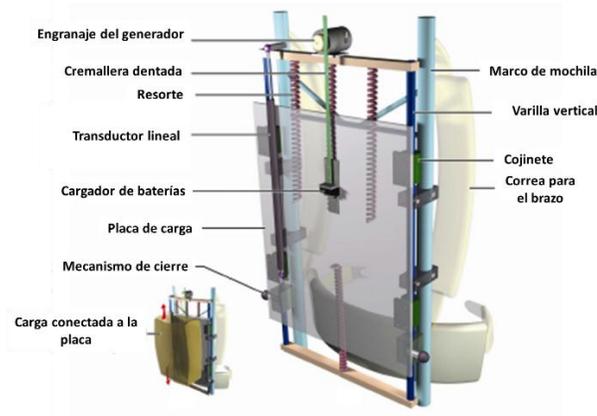


Figura 3. Recuperación de energía en discoteca a través del baile.

### 2.1.3 Recuperación de energía en mochilas

Se presenta un método de recolección de energía a partir de un mecanismo adaptado a una mochila que puede generar energía eléctrica al caminar las personas. Se logra la generación de energía a partir de las fuerzas diferenciales que se generan entre el portador y la masa de carga. Las pruebas experimentales de captación de energía dan como resultado una potencia de 7.5 W con masa de 20 kg y a una velocidad de 3.4 km/h. el principio de este tipo de SIREC donde la masa se desplaza 8 cm a través del resorte.

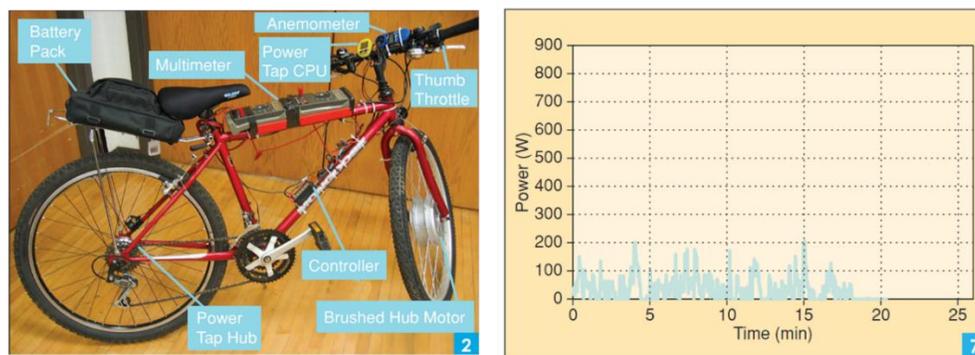
La potencia depende de la rapidez del desplazamiento, velocidad al correr o caminar, si es muy rápido la potencia es mayor, si es más lento la potencia disminuye, el manejo de la potencia es trabajo directo del dispositivo de conversión y transferencia de energía [14-15]. Esta forma de recuperación se muestra en la Figura 4.



*Figura 4. Recuperación de energía en una mochila.*

#### **2.1.4 Recuperación de energía en bicicletas**

Se presentan el diseño e implementación de un proyecto de recuperación de energía que consiste en adaptar un generador Brushed a una bicicleta que convertirá la energía humana en energía eléctrica para almacenar a través de una batería que utilizará la población para encender las luces y otros servicios. Es una iniciativa para llevar la energía segura y confiable a todas las personas sin electricidad [16-17]. Esta forma de recuperación se muestra en la Figura 5. Este sistema se probó a una velocidad de 32 km/h durante 20 minutos, donde el generador produce una potencia de 35watts, esto considerando el peso de una persona promedio de 80kg más el peso de la bicicleta de 20kg.



a)

b)

Figura 5. Recuperación de energía en una bicicleta a) prototipo y b) perfil de potencia

### 2.1.5 Análisis energético de los diferentes SIREC

El análisis de los diferentes sistemas de recuperación de energía se presenta en la Tabla 3 considerando los parámetros proporcionados por los diferentes autores.

Tabla 3. Análisis energético de los diferentes SIREC.

Aplicación	Masa (kg)	Distancia (m)	Potencia (W)	Aceleración ( $m/s^2$ )	Tiempo (s)	Energía (J)
Puertas	***	***	55	***	2	110
Mochilas	20	0.08	***	9.81	***	15.696
Pista de baile	80	0.1	***	9.81	***	78.48
bicicletas	100	***	40	***	2	80

Es importante considerar estos sistemas presentados en la literatura, para proponer las mejores condiciones de diseño del SIREC cuyo propósito es recuperar energía en los procesos de pruebas de aceleración y desaceleración de vehículos.

### 2.2 Sistemas de almacenamiento de energía

Para aumentar la confiabilidad, calidad, seguridad y estabilidad la mayoría de las aplicaciones requieren un suministro de energía constante, en los SIREC y en fuentes de energía limpia, como solar, eólica y otras, el problema de intermitencia hace necesario el uso de un sistema de almacenamiento que garantice el suministro continuo de energía. Algunas aplicaciones necesitan energía estable, por ejemplo, un vehículo eléctrico o fuente de alimentación ininterrumpida, por eso se tiene que utilizar los sistemas de almacenamiento de energía.

Existen una gran variedad de ellos, entre los cuales podemos encontrar baterías, volantes de inercia, ultra capacitores, aire comprimido y almacenamiento térmico entre otros, sin embargo, en esta sección se mencionan algunos tipos de almacenamiento de energía que se proponen para el SIREC [18].

### **2.2.1 Baterías**

Las baterías son comúnmente utilizadas como sistema de almacenamiento. Sin embargo, los límites de la capacidad almacenamiento y el voltaje de batería no son suficientes para suministrar altas potencias en ciertas aplicaciones. Por lo antes mencionado se recurre a conexiones en paralelo o en serie de baterías dependiendo la potencia que requiera la aplicación.

Por otro lado, los desequilibrios de las baterías causan sobrecargas o sobredescargas que ocasiona los deterioros en las baterías y por consecuencia se reduce su tiempo de vida; esto no solo reduce la utilización de energía eléctrica y la duración de la batería, también causa el problema de seguridad. En este sentido, es importante el análisis de topologías de convertidores cd-cd capaces de hacer una adecuada trasferencia de energía entre el SIREC y el banco de baterías [18].

#### **2.2.1.1 Diferentes tecnologías**

Las baterías o acumuladores recargables son una de las formas de almacenamiento eléctrico utilizadas. Las tecnologías más utilizadas son: plomo ácido, níquel cadmio, litio-ion. En la literatura se presentan aplicaciones donde incorporan esta tecnología en aparatos como: aeronaves, iluminación doméstica acompañados con sistemas fotovoltaicos, vehículos eléctricos e híbridos, sistemas eólicos, microrredes eléctricas, entre otros. Las baterías se caracterizan por su alta densidad de energía, sin embargo, la potencia de salida está limitada por la corriente máxima de descarga y más limitada aun en la recarga [19].

Estas pueden responder a los cambios en demanda de la energía en microsegundos; solamente los ultracapacitores superan su tiempo de reacción. La mayoría de las baterías contienen materiales tóxicos y tienen impacto en el medio ambiente. Su eficiencia va desde 85% – 90%. En la Tabla 4 se describen algunas características de las principales tecnologías en baterías.

Tabla 4. Características de las diferentes tecnologías en baterías.

Tipo de batería	Eficiencia (%)	Densidad de energía (Wh/kg)	Densidad de potencia (W/kg)	Ciclos de vida	Tiempos de carga	Tiempos de descarga
Plomo-ácido	70-80	20-35	25	200-3000	Lento	Medio
Níquel-cadmio	50-80	40-60	149-180	500-3000	Lento	Medio
Li-ion	80-90	100-200	300	500-3000	Lento	Alto
NaS	70	120	120	3000	Lento	Medio

Cabe mencionar que la tecnología de plomo ácido es la más económica en el mercado y la tecnología más estudiada en aplicaciones de almacenamiento de energía [19].

### 2.2.2 Volantes de inercia

El volante de inercia es, básicamente, un sistema de almacenamiento de energía mecánica. Su principal característica frente a otros sistemas es la capacidad de absorber y ceder energía en poco tiempo. Es adecuado para sistemas mecánicos de ciclo energético discontinuo donde el periodo de tiempo de transferencia de energía sea muy corto, por lo que, tradicionalmente, se ha utilizado en motores y compresores alternativos, prensas y troqueladoras, etc. Los volantes tradicionales, en comparación con otros sistemas de almacenamiento, tienen una menor densidad de energía. Sin embargo, en las últimas décadas se han introducido materiales compuestos en su fabricación, lo que ha permitido un aumento notable de su capacidad de almacenamiento. Esta innovación permite aplicarlos a campos en los que antes era totalmente impensable, por ejemplo, para almacenamiento de energía en automóviles, trenes o autobuses, satélites y sistemas de emergencia (UPS) entre otros. [20].

Con este nuevo tipo de volantes se superan algunas limitaciones de los sistemas clásicos de almacenamiento de energía a base de volantes. Por ejemplo, si se comparan con las tradicionales baterías químicas, los volantes ofrecen mayor potencia energética, tanto entregada como absorbida.

Las baterías, debido a su proceso químico, son muy lentas en el proceso de carga y descarga, y si se pretende disminuir el tiempo, su rendimiento desciende a valores del 20 o el 30 %.

El tiempo de vida útil de los volantes es aproximadamente de 20 años considerando que la principal falla de estos sistemas se encuentra en el generador eléctrico encargado de transferir la energía del sistema.

Para comparar los acumuladores cinéticos con otros sistemas de almacenamiento se utilizan los conceptos de densidad de energía y de densidad de potencia, por unidad de masa del acumulador, para expresar la capacidad de almacenar e intercambiar energía. En la Figura 6 se presenta un gráfico comparativo entre los volantes de inercia y algunos sistemas comunes aplicados a vehículos. Se representan en coordenadas de densidad de energía másica, en  $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ , y densidad de potencia másica, en  $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ , las regiones de trabajo de los volantes, las baterías químicas, los motores de combustión interna y la célula de combustión [21-22].

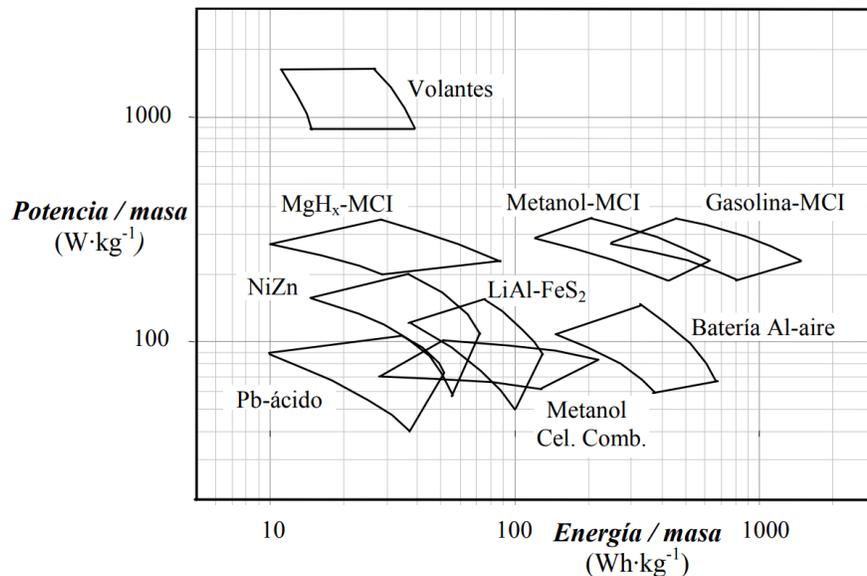


Figura 6. Comparación de la densidad de potencia en función de la densidad de energía entre volantes, motores de combustión interna, baterías y células de combustión.

Se observa que la densidad de potencia másica en los volantes es muy elevada comparada con los diversos tipos de baterías químicas, incluso con los motores de combustión interna.

En cambio, su densidad de energía másica es comparable con las baterías convencionales y es más baja que las baterías especiales y los motores, esto se consiguió gracias a las nuevas tecnologías como acoplamientos magnéticos y volantes de materias compuestas que permiten tener un momento de inercia superior y soporta altas velocidades sin deformarse. Por lo tanto, la principal característica de los volantes es su alta densidad de potencia [22].

### 2.3 Convertidores CD-CD analizados afines al proyecto

En base a las condiciones de operación del SIREC se buscó topologías de convertidores CD-CD que sean capaces de manejar una entrada variable, sin grandes variaciones del ciclo de trabajo con respecto a la ganancia de entrada-salida, además de que sean capaces de manejar alta densidad de potencia y con alta eficiencia, siendo la familia de convertidores reductores, los más aplicados para este tipo de sistemas.

#### Convertidor Buck

En aplicaciones de alta densidad de potencia se ha buscado una alta eficiencia como es el caso de sistemas de alimentación de trolebuses en países europeos, donde utilizando tecnologías de SiC (Carburo de Silicio) se logrando tener la menor cantidad de pérdidas en las conmutaciones. Hrusca y M. Jara en el 2016 analizaron un convertidor Buck para conocer su eficiencia, considerándolo como cargador de baterías para un sistema auxiliar al arranque en un trolebús en República Checa. La eficiencia del convertidor Buck cuando la tensión está en el nivel más bajo permisible ( $400 V_{CD}$ ) es superior al 88% logrando mejorar un 4% en la eficiencia con respecto a tecnología de silicio convencional, el rango para esta aplicación es de 5 kW. En la Figura 7 se observa la topología estudiada y su eficiencia en esta aplicación [23].

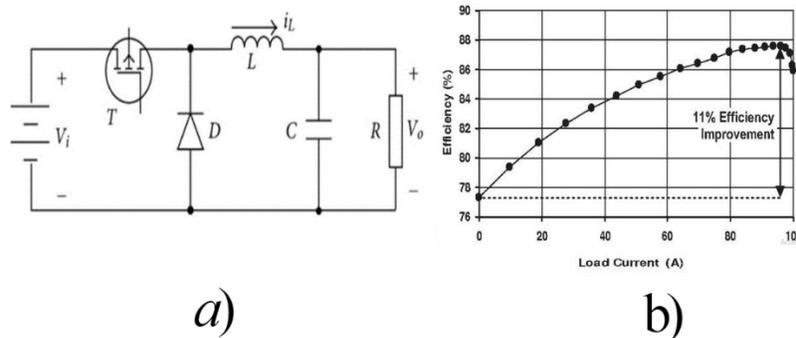


Figura 7.a) Topología Buck y b) eficiencia en comparación con la corriente de salida.

### Convertidor Buck cuadrático

V. M. Pacheco y A. J. do Nascimento desarrollaron un convertidor Buck cuadrático con conmutación suave, minimizando las pérdidas en las conmutaciones alcanzando una eficiencia del 91.5%. Sin embargo, esto se logra introduciendo dos redes resonantes, lo que aumenta el grado de complejidad del circuito.

En la Figura 8 se observa la eficiencia del convertidor Buck cuadrático vs la potencia de salida alcanzando una eficiencia del 91.5% a una carga de 400W, esta topología sin red resonante alcanza una eficiencia del 88% [24].

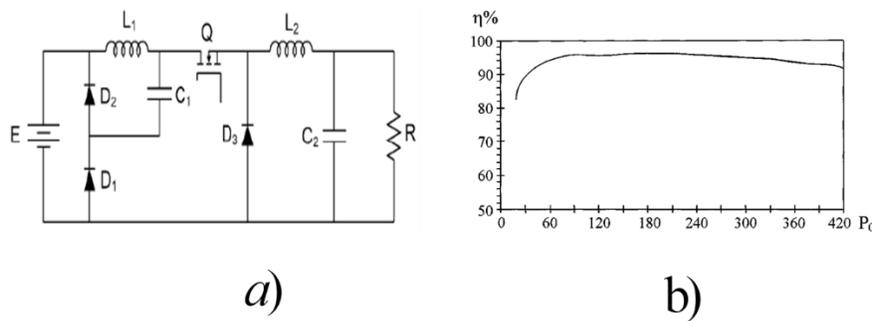


Figura 8. a) Topología Buck cuadrático y b) eficiencia del convertidor Buck cuadrático vs potencia de salida.

### Convertidor Buck-boost

En 2011 A. Juson y A. Mirzael realizaron un estudio de la topología Buck-Boost para realizar la carga de baterías incluyendo sistemas de conmutación suave a cero de corriente y cero de voltaje alcanzando una eficiencia del 96%, siendo una gran mejoría sobre el convertidor convencional cuando realiza una conmutación dura. Sin embargo, este convertidor fue utilizado de manera bidireccional sin embargo en el modo de elevador la eficiencia caía a una eficiencia del 92%. Esta conmutación suave se logra implementando sistemas resonantes de ayuda a la conmutación. En la Figura 9 se observa una comparativa de la eficiencia del convertidor Buck-Boost con y sin conmutación suave vs la potencia de salida [25].

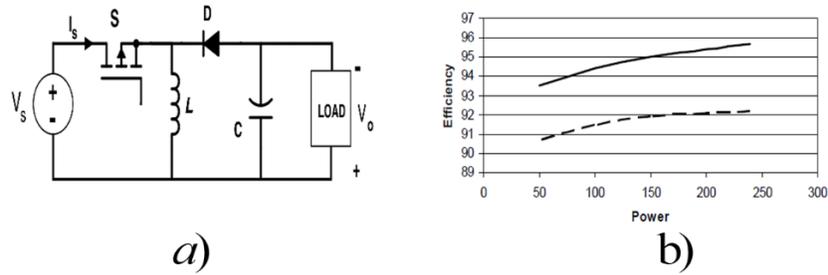


Figura 9. a) Topología buck-boost y b) eficiencia del convertidor Buck-Boost con conmutación suave vs el convertidor Buck-Boost convencional.

### Convertidor Flyback

El convertidor Flyback es ampliamente utilizado para aplicaciones de alta tensión y baja potencia. Presenta la característica de que no integra un inductor en su etapa de salida, lo cual representa una ventaja de costo y tamaño frente a los demás convertidores aislados. También es una topología utilizada en aplicaciones de múltiples salidas, dado que las salidas responden más rápidamente al no tener inductor de filtrado. Además, es un convertidor que presenta una estructura simple, robusta y proporciona aislamiento.

Sin embargo, el elevado esfuerzo de tensión en el interruptor principal, la “baja” utilización de la estructura magnética y el elevado rizado a la salida son sus principales desventajas. En la Figura 10 se observa la eficiencia del convertidor Flyback alcanzando una eficiencia del 86% a una carga de 90 W [26].

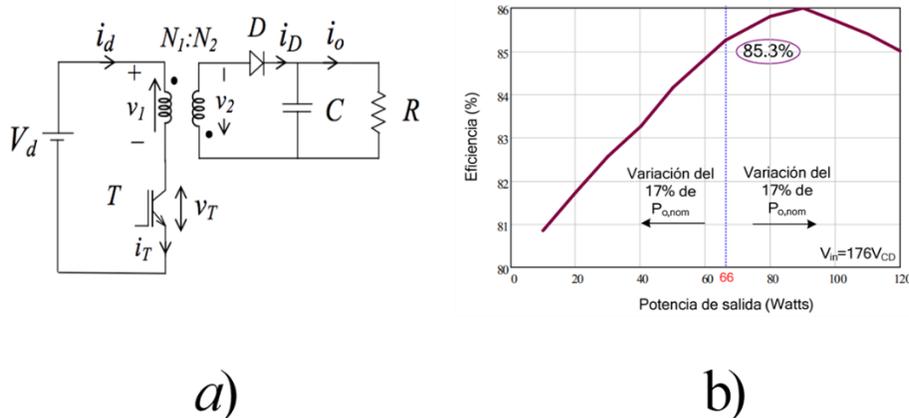


Figura 10. a) Topología Flyback y b) eficiencia del convertidor Flyback vs potencia de salida.

## Buck multifase

Los convertidores multifase ofrecen altas eficiencias debido a que las pérdidas no se enfocan en un solo componente, lo que ocasiona también que la disipación de calor sea menor con lo cual se puede omitir el uso de disipadores de calor. Son buenos candidatos para disminuir rizados de corriente en la entrada y en la salida debido al efecto de cancelación de rizados. En la Figura 11 se observa la eficiencia del convertidor Buck multifase alcanzando un 94% de eficiencia [27]. Esta topología muestra que entre mayor número de fases las pérdidas se distribuyen y la eficiencia aumenta al haber una buena gestión térmica.

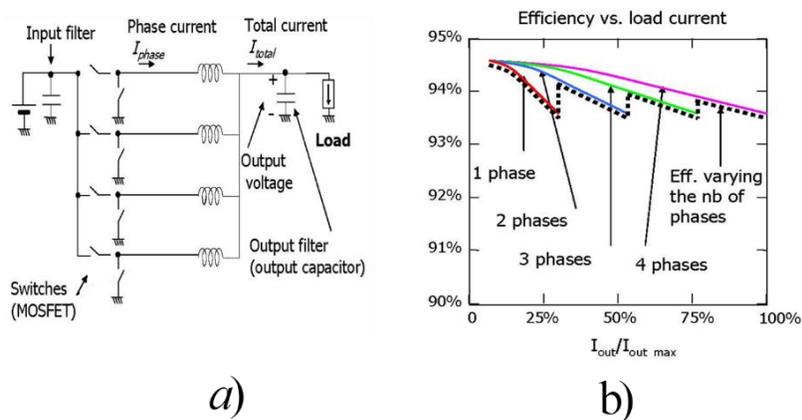


Figura 11.a) Topología Buck multifase y b) eficiencia del convertidor Buck multifase.

Como se puede ver en la Figura 12, que, con un ciclo de trabajo muy pequeño, la cancelación del rizo es pobre en el Buck multifase. Por lo tanto, el beneficio del convertidor multifase con el efecto de cancelación del rizo se da a partir de un determinado tamaño del ciclo de trabajo [28].

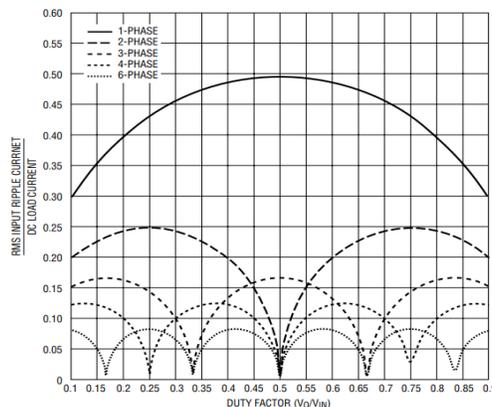


Figura 12. Influencia del ciclo de trabajo en la cancelación del rizo de corriente

## 2.4 Conclusiones del estado del arte

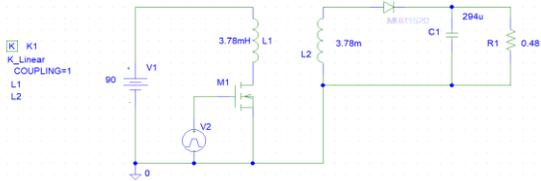
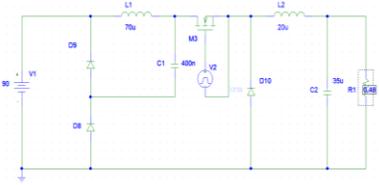
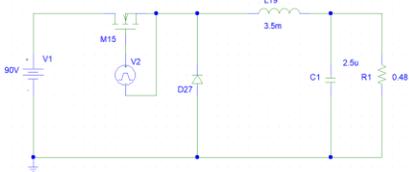
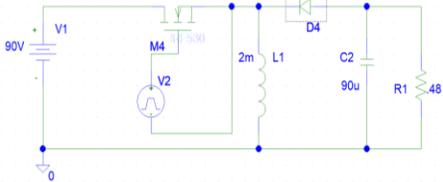
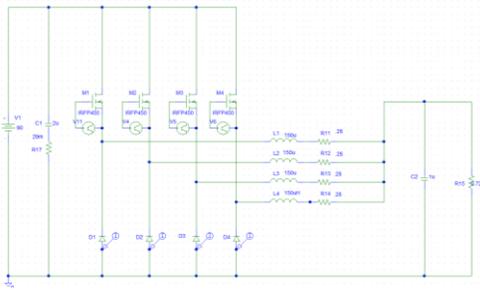
En base al estudio del estado del arte se ha simulado en OrCAD Pspice, bajo las mismas condiciones de potencia, las topologías analizadas para observar el comportamiento real ante las condiciones que impondrá el sistema de recuperación de energía propuesto. Para llevar a cabo la comparación de las topologías analizadas en la literatura se simularon para condiciones nominales del SIREC como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de comparación para las topologías estudiadas.

Parámetros	Símbolo	Unidad	Valor Nominal
<b>Potencia de entrada</b>	$P_{in}$	[W]	<b>1000</b>
<b>Voltaje de entrada</b>	$V_{in}$	[V]	<b>90</b>
<b>Voltaje de salida</b>	$V_o$	[V]	<b>24</b>
<b>Corriente de salida</b>	$I_o$	[A]	<b>41.5</b>
<b>Frecuencia</b>	$f_s$	[Hz]	<b>100000</b>

En la Tabla 6 se observan las topologías estudiadas y sus resultados de eficiencias alcanzadas con las condiciones mencionadas en la Tabla 4.

Tabla 6. Simulación de topologías estudiadas en el estado del arte.

Nombre de convertidor cd-cd	Topología	Eficiencia
<b>Flyback</b>		<b>86%</b>
<b>Buck cuadrático</b>		<b>89%</b>
<b>Buck convencional</b>		<b>91%</b>
<b>Buck- Boost</b>		<b>90%</b>
<b>Buck multifase asíncrono</b>		<b>95%</b>

Se concluye que la topología más recomendada para el sistema de recuperación de energía es el convertidor Buck multifase asíncrono por sus ventajas en aspectos de eficiencia y manejo de densidad de potencia.

---

## Capítulo 3

### Dimensionamiento y manejo de energía en el SIREC

---

En este capítulo se analiza el Sistema de Recuperación de Energía Cinética (SIREC) en cada una de sus etapas de conversión y transferencia de energía. En base a las especificaciones obtenidas se dimensionará la etapa de conversión y almacenamiento de energía que cumpla con las especificaciones requeridas para ser utilizada como propuesta de solución de este proyecto de tesis.

### 3.1 SIREC basado en un volante de inercia

Se propone un sistema de recuperación de energía en base a volante de inercia. La cantidad de energía a recuperar debe provenir mayormente del volante y no directamente de los rodillos durante la prueba de los vehículos. A manera de demostración se plantea recuperar la misma cantidad de energía que durante la prueba de rodillos. El volante se dimensiona para almacenar dicha energía o mayor.

En la Figura 13 se muestra el esquema general del sistema de recuperación de energía. Los rodillos donde se realizan las pruebas de salida de los vehículos terminados imponen las condiciones de velocidad al SIREC, el cual está acoplado a los rodillos a través de un convertidor electromecánico, el cual incluye una transmisión unidireccional y el volante de inercia para mejorar el proceso de transferencia de energía [29].

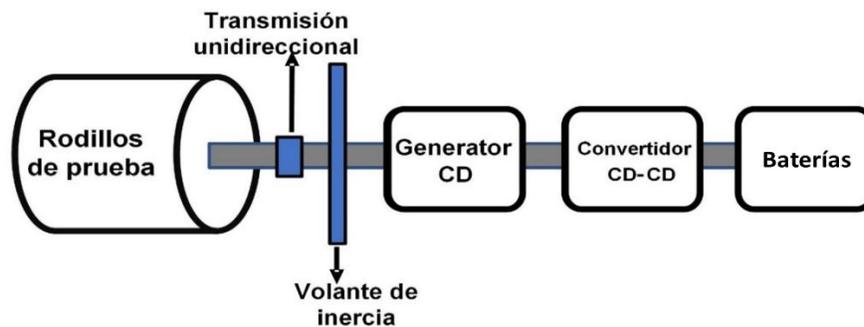


Figura 13. SIREC basado en un volante de inercia para aplicación en la industria automotriz

### 3.2 Pruebas a vehículos en los rodillos de aceleración y desaceleración

En la Tabla 7 se observan los tiempos y las condiciones de velocidad alcanzadas en los rodillos durante las pruebas realizadas a vehículos fabricadas dentro de la industria. El tiempo entre pruebas realizadas a cada vehículo tiene una pausa de dos a tres minutos aproximadamente. Ese tiempo de espera se ocupa para transferir la energía del volante de inercia al sistema de almacenamiento.

Tabla 7. Condiciones de velocidad en pruebas a vehículos.

	Pruebas estándar		Tacómetro	
	Velocidad (km/h)	Teórica (rpm)	Lectura física (rpm)	Tiempo de pruebas (segundos)
1	40	286.8	279	3
2	60	430.1	418	31
3	80	573.5	559	
4	100	716.9	697	
5	120	860.4	836	3
<b>Tiempo total de pruebas</b>				37

La cantidad de energía a recuperar debe provenir mayormente del volante y no directamente de los rodillos durante la prueba. Se llevan a cabo 720 pruebas al día considerando las dos estructuras de pruebas que se encuentran dentro de la fábrica. En la Tabla 8 se describe las características de la salida del generador acoplado a los rodillos.

Tabla 8. Pruebas a la parte electromecánica del sistema.

Rodillos		Acoplamiento unidireccional		Volante		Generador CD	
$\omega_{\text{ROD}}$ (rpm)	$T_P$ (s)	$R_t$	$J_M$ (kg-m <sup>2</sup> )	$E_v$ (Joules)	$\omega_g$ (rpm)	$V_G$ (volts)	
418	5	2.60	0.2	*****	1086	42	
559	8	2.60	0.2	*****	1453	73	
697	8	2.60	0.2	3534	1800	90	
835	8	2.60	0.2	5168	2171	108	
835	3	2.60	1	25840	2171	108	
835	5	2.60	2	51680	2171	108	

Donde:  $T_P$  es el tiempo de prueba;  $R_t$  es la relación transmisión;  $J_M$  es Momento inercia del volante;  $V_G$  es el voltaje generado de la máquina;  $\omega_{\text{ROD}}$  es la velocidad de los rodillos;  $\omega_g$  es la velocidad del generador;  $E_v$  es la energía del volante y  $\omega_g$  velocidad del generador de cd [29].

### 3.3 Selección del generador para el SIREC

Se utiliza una máquina eléctrica, acoplada a los rodillos, para transformar la energía mecánica en eléctrica. Se seleccionó una máquina de imanes permanentes de 1800 rpm y 90 V a una potencia nominal de 1 HP. La velocidad de rotación ( $\omega_g$ ) es proporcionada al eje a través de una transmisión, la cual es seleccionada para que la máquina funcione dentro del rango de velocidad nominal de 1800 rpm.

Con lo anterior se logra operar en las condiciones nominales de voltaje de salida ( $V_G$ ) 90 V manteniendo una corriente nominal de 8.2 A con la potencia nominal de 1 HP. En la Figura 14 se observa el generador utilizado en el prototipo.



Figura 14. Generador cd de imanes permanentes.

### 3.3.1 Características eléctricas

La simulación del sistema de recuperación de energía requiere la integración de cada una de las partes que lo componen, por eso es importante caracterizar el generador de cd para modelar el sistema completo. En la Tabla 9 se muestran las especificaciones del generador de imanes permanentes.

Tabla 9. Especificaciones del generador de cd.

<i>ESPECIFICACIÓN</i>			
<b>Características</b>	Base removible	<b>Diam. del eje</b>	5/8"
<b>Amperaje de carga total</b>	10.0	<b>Voltaje</b>	90 V
<b>Hp</b>	1	<b>Díam. la envoltura</b>	40 degrees C
<b>Artículo</b>	Generador de imanes permanente	<b>Diseño del motor</b>	CD imán permanente
<b>Clase de aislamiento</b>	F	<b>Aplicación del motor</b>	Velocidad variable
<b>RPM nominal</b>	1800	<b>Tipo del montaje del motor</b>	Cara base
<b>Longitud total</b>	14-13/16"	<b>Grupo Rpm</b>	1701-1800
<b>Normas</b>	Reconocimiento por UL(E47479)	<b>Marca</b>	EMERSON
<b>Armazón</b>	56C		

Para comprobar el modelo eléctrico se caracterizó el generador de cd con ayuda de pruebas establecidas en la norma *IEEE 43-2013* considerando que el generador de imanes permanentes es similar a un motor en derivación. En la Figura 15 se presenta el modelo eléctrico del generador de cd de imanes permites.

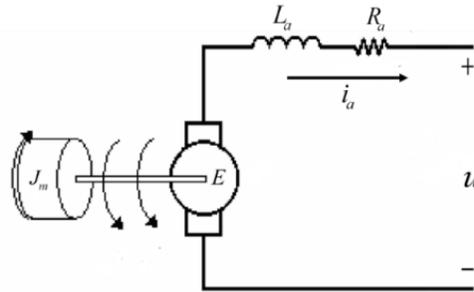


Figura 15. Modelo eléctrico del Generador de CD de imanes permanentes.

Donde E es la fuerza contraelectromotriz, La es la inductancia de armadura, Ra es la resistencia de armadura. Por lo cual se realizaron algunas pruebas al generador de CD para caracterizar estos valores del modelo eléctrico.

Se realiza una prueba a rotor bloqueado para el cálculo de resistencia de armadura (Ra) del generador de cd mostrando los resultados en la Tabla 10. Esta prueba consiste en alimentar el generador de cd y bloquear el rotor en diferentes voltajes y observar la corriente que demanda.

Tabla 10. Pruebas a rotor bloqueado para cálculo de la resistencia serie.

Voltaje(V)	Corriente(I)	Resistencia (Ra)
10	0.6452	15.49907006
15	0.993	15.10574018
20	1.31	15.26717557
25	2	15.60549313
30	2.01	14.92537313
35	2.3	15.2173913
40	2.53	15.81027668
<b>Promedio</b>		<b>15.22030191</b>

La inductancia de la armadura se obtiene inyectando una señal sinusoidal al generador de CD y observando el desfase entre la corriente y el voltaje. La Figura 16 muestra el desfase de  $46^\circ$  entre la corriente y el voltaje. El voltaje aplicado en esta prueba es de  $9.2 V_{RMS}$  y una corriente de  $3.2 A_{RMS}$  una frecuencia de 58 Hertz [30].

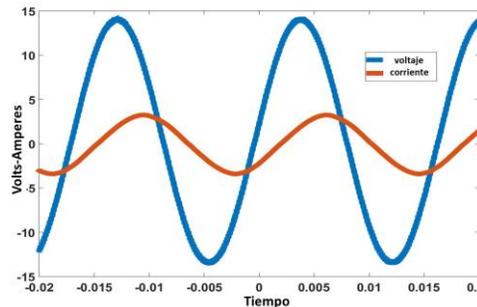


Figura 16. Pruebas para determinar la inductancia de armadura.

En la ecuación 1 se describe el cálculo de la inductancia de armadura con el voltaje y corriente aplicados a el generador de cd.

$$L_a = \frac{V \sin 46^\circ}{2\pi If} = 5.6mH \quad (1)$$

### 3.4 Diseño y dimensionamiento del volante de inercia

El volante de inercia es muy importante en el funcionamiento del SIREC, ya que la energía almacenada durante cada prueba es transferida a un sistema de almacenamiento. La relevancia del volante radica durante las pruebas de desaceleración debido a que la transmisión unidireccional desacopla el volante de los rodillos y con esta acción evita que la energía presente en el volante se pierda por efectos de fricción impuestas por las llantas del vehículo. Sin embargo, el dimensionamiento del volante de inercia está asociado con la máquina eléctrica (generador), esto quiere decir que el proceso de transferencia de la energía hacia batería depende de las condiciones de velocidad en que se encuentre el volante y por tanto también el generador. A mayores velocidades, mayor voltaje de salida del generador y también el tiempo de transferencia se puede reducir. Por tanto, el diseño del volante es basado a las velocidades alcanzadas (1800 rpm).

La energía cinética almacenada es proporcional a la velocidad del volante y su tamaño depende de su momento de inercia. La velocidad angular es mayor a medida que aumenta la energía almacenada del volante, esta es una razón importante para operar los volantes a altas velocidades de rotación. La energía del volante está en función de la velocidad angular y de su momento de inercia, la cual está definida por la ecuación 2.

$$E_v = \frac{1}{2} J_M * (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (2)$$

Donde  $E_v$  es la energía cinética almacenada en el volante,  $J_M$  es el momento de inercia ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ),  $\omega_{\max}$  es la máxima velocidad angular ( $\text{rad/s}$ ) y  $\omega_{\min}$  es la velocidad mínima de operación del volante donde se le puede extraer energía. Para reducir la masa de un volante es importante el diseño adecuado para la energía que maneja el SIREC. En base a las ecuaciones 3 y 4 se diseñó el volante.

$$J_M = \frac{1}{2} m * (r_1^2 + r_2^2) \quad (3)$$

$$m = v * \rho \quad (4)$$

Donde  $m$  es la masa del material ( $\text{kg}$ ),  $r_1$  es radio mayor (metros) y  $r_2$  es radio menor (metros). El momento de inercia de un volante puede definirse en función del tamaño del volante relacionado con las especificaciones de masa y diámetro del disco [32]. Para el SIREC, se propone el diseño de un volante inercial como el mostrado en la Figura 17 a) con dos radios diferentes para tener un mayor momento de inercia, en la Figura 17 b) el momento de inercia es mayor que c), considerando que b y c tienen la misma masa y el mismo diámetro, pero diferentes radios, asumiendo que el grosor del b es mayor. La inercia del volante b) es mayor, esto debido a que las fuerzas que se oponen al momento de inercia son menores, caso diferente que si el volante fuera equitativo en su distribución de la masa como es el caso del diseño c).

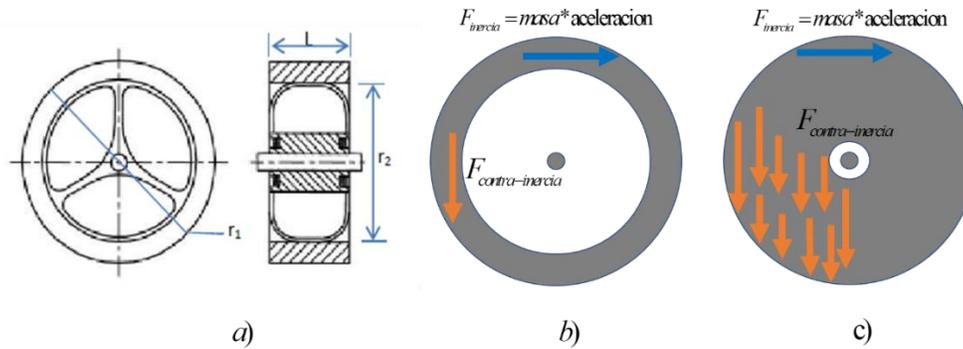


Figura 17.a) Diseño del volante de inercia para el SIREC, b) diseño con mayor momento de inercia, c) diseño con menor momento de inercia.

Para el diseño del volante se usan las expresiones que han sido presentadas anteriormente. La Tabla 11 muestra los cálculos de volantes de inercia de tipo tambor de diferentes dimensiones para estimar la cantidad de energía que pueden almacenar.

Lo anterior para las especificaciones de  $\omega=1800\text{ rpm}$ , la densidad del material ( $\rho$ ) acero es de  $7850\text{ kg/m}^3$  y aluminio de  $2700\text{ kg/m}^3$ .

Tabla 11. Cálculos de diseño de un volante tipo tambor con diferentes capacidades de almacenamiento de energía.

$r_1$ (m)	$r_2$ (m)	Ancho tambor L(m)	Volumen tambor ( $\text{m}^3$ )	Masa acero (kg)	Masa Alum. (kg)	Mto. Inercia Acero ( $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ )	Mto. Inercia Alum. ( $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ )	Energía acero (Joule)	Energía Alum. (Joule)
0.1	0.08	0.05	0.000565	4.43906	1.526813	0.03640	0.01251	646.661	222.412
0.15	0.13	0.05	0.000880	6.90521	2.375042	0.13603	0.04678	2416.65	831.207
0.25	0.15	0.05	0.002749	21.5787	7.422006	0.67433	0.23193	12979.7	4120.43
0.3	0.25	0.05	0.004320	33.9095	11.66315	2.58560	0.88931	46933.8	15798.91
0.3	0.2	0.05	0.007854	61.6537	21.20573	4.00749	1.37837	71194.1	24487.14
0.3	0.2	0.03	0.004712	36.9922	12.72344	2.40449	0.82702	42716.4	14692.28

Para el prototipo de laboratorio se elige un volante de inercia de 25 cm de radio seleccionando el acero como material para esta aplicación. Como se muestra en las estimaciones de la Tabla 11 en la medida que se incrementa el momento de inercia del volante la energía almacenada es mucho más significativa que la recuperada directamente durante la prueba.

### 3.5 Modelo matemático del SIREC

El SIREC propuesto se analizó en forma matemática [33-35], con el fin de modelar y estudiar el comportamiento dinámico del sistema de recuperación como se observa en la Figura 18.

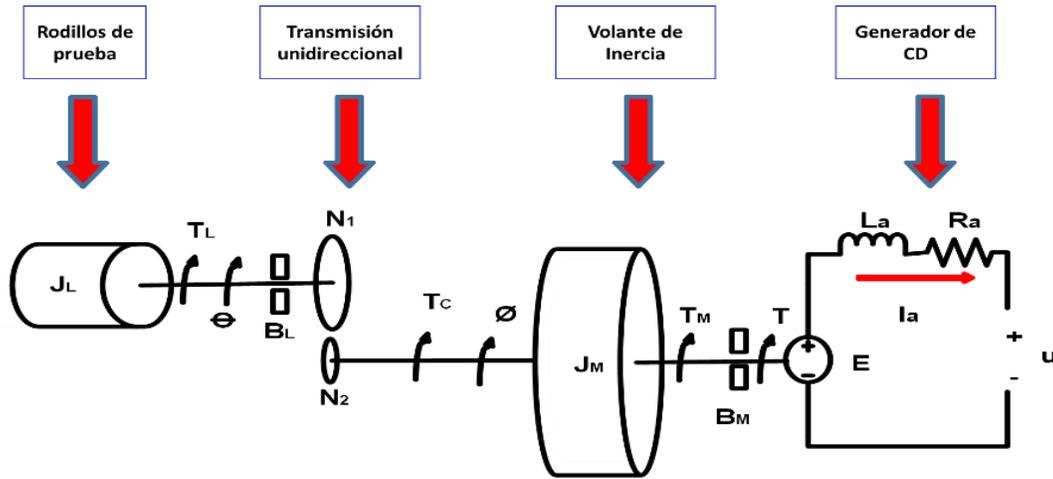


Figura 18. Modelo electromecánico del sistema de recuperación de energía.

Para realizar el análisis de transmisión del par aplicado ( $T$ ) a la entrada del generador de cd se plantean las siguientes relaciones entre el número de dientes  $N_1$  y  $N_2$ , los ángulos de desplazamiento  $\theta$ ,  $\phi$  y los pares de torsión transmitidos por  $T_L$  y  $T_c$  que están dados por las Ecuaciones 5 y 6.

$$\frac{T_L}{T_c} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

$$\frac{\theta}{\phi} = \frac{N_2}{N_1} \quad (6)$$

Realizando el análisis de los pares de cada parte del sistema se plantean las siguientes ecuaciones:

$$J_L \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_L \frac{d\theta}{dt} + T_L = 0 \quad (7)$$

$$J_M \frac{d^2\phi}{dt^2} + B_M \frac{d\phi}{dt} + T_c = T \quad (8)$$

Considerando las Ecuaciones 5 y 6 despejamos  $T_L$  y  $\theta$ .

$$T_L = \frac{N_1}{N_2} T_C, \quad \theta = \frac{N_2}{N_1} \phi \quad (9)$$

Sustituyendo las Ecuaciones 9 en 7 se tiene que:

$$T_C = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 J_L \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 B_L \frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

Ahora se sustituyó la ecuación 10 en la ecuación 8 para obtener el par que se aplica en la entrada del generador de cd.

$$T = J_M \frac{d^2 \phi}{dt^2} + B_M \frac{d\phi}{dt} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 J_L \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 B_L \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

Considerando a  $\frac{N_2}{N_1} = N$  y agrupando términos se simplifica la ecuación del par a la entrada del generador de cd.

$$T = \left( J_M + (N)^2 J_L \right) \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \left( B_M + (N)^2 B_L \right) \frac{d\phi}{dt} \quad (12)$$

En base al modelo en la Figura 18 se analiza el circuito eléctrico con la ley de voltaje de Kirchhoff.

$$R_a i + L_a \frac{di}{dt} = u - E \quad (13)$$

La ecuación 14 describe el modelo matemático del sistema mecánico hacia la entrada al generador. El par (T) produce la velocidad angular ( $\phi$ ) y el desplazamiento.

$$\left( J_M + (N)^2 J_L \right) \frac{d^2 \phi}{dt^2} = T - \left( B_M + (N)^2 B_L \right) \frac{d\phi}{dt} \quad (14)$$

La fuerza contra electromotriz está dada por la ecuación 15.

$$E = K_b \frac{d\phi}{dt} = K_b * \phi \quad (15)$$

El par desarrollado por el sistema mecánico hacia el generador está dado por la ecuación 16.

$$T = k_j * i \quad (16)$$

Se aplica transformada de Laplace a las Ecuaciones a la ecuación 17 y 18.

$$L_a s * i(s) + R_a * i(s) = u(s) - E(s) \quad (17)$$

$$E(s) = K_b s * \phi(s) \quad (18)$$

Se sustituyó la ecuación 18 en la ecuación 17 y se obtiene la ecuación de la corriente de armadura expresada en la ecuación 19.

$$i(s) = \frac{u(s) - k_b s * \theta(s)}{L_a s + R_a} \quad (19)$$

Se aplica transformada de Laplace a las Ecuaciones a la ecuación 14 y 16.

$$\left( J_M + (N)^2 J_L \right) s^2 * \phi(s) - \left( J_M + (N)^2 J_L \right) s * \phi(0) = T(s) - \left( B_M + (N)^2 B_L \right) s * \phi(s) \quad (20)$$

$$T(s) = k_j * i(s) \quad (21)$$

Sustituyendo la ecuación 21 en la ecuación 20 y despejando  $\phi(s)$  se obtiene el desplazamiento del generador de cd expresa en la ecuación 22.

$$\phi(s) = \frac{k_j * i(s)}{(J_M + (N)^2 J_L) s^2 + (B_M + (N)^2 B_L) s} \quad (22)$$

La ecuación es válida solo bajo las siguientes condiciones:

Cuando  $J_L \geq J_M$  la inercia de  $J_L$  se considera despreciable o prácticamente cero esto debido a que la inercia que imponen los rodillos sobre el volante es la que se ve reflejada en el generador y cuando  $J_M \geq J_L$  significa que los rodillos se han desanclado del volante de inercia por lo cual la  $J_L = 0$  y la inercia que se ve reflejada en el volante es la del volante.

### 3.5.1 Simulación del SIREC a velocidad nominal

Una vez analizado el SIREC se implementaron las ecuaciones en el software de Matlab con la finalidad de analizar el sistema de recuperación. En la Figura 19 Se muestra el diagrama del SIREC en base a las ecuaciones obtenidas anteriormente.

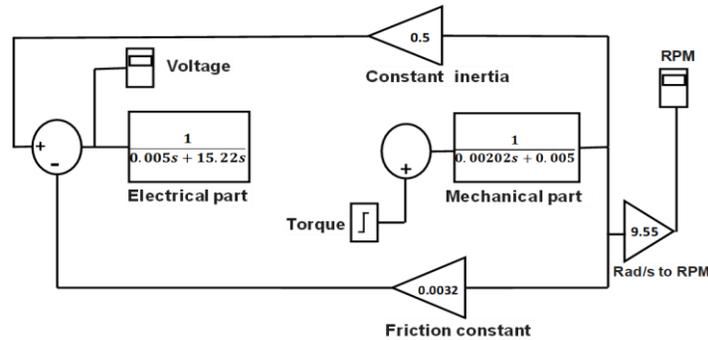


Figura 19. Simulación del generador en diferentes condiciones de velocidad.

En la Tabla 12 se observa la comparación entre los resultados experimentales y los resultados obtenidos en simulación del generador de CD en diferentes velocidades. Considerando que esas velocidades son las que imponen los rodillos [43].

Tabla 12. Comparación de resultados de simulación comparado con valores experimentales.

Velocidad (RPM)	Voltaje de salida del generador (Volts)	
	Simulación	Experimental
800	41.32	40
1090	54.35	54
1450	72.65	73
1800	90.22	90
2170	108.56	108

### 3.6 Manejo de energía en el SIREC

En la Figura 20 se muestra el esquemático de la simulación del SIREC acoplado al volante de inercia y a una carga resistiva; bajo condiciones nomines de operación, en este caso se le demando 40 amperes. Para analizar la cantidad de energía almacenada en el volante de inercia se desarrolla el SIREC en el simulador Power SIM, esto para verificar las cantidades de energía que se transfiere del volante de inercia al banco de baterías.

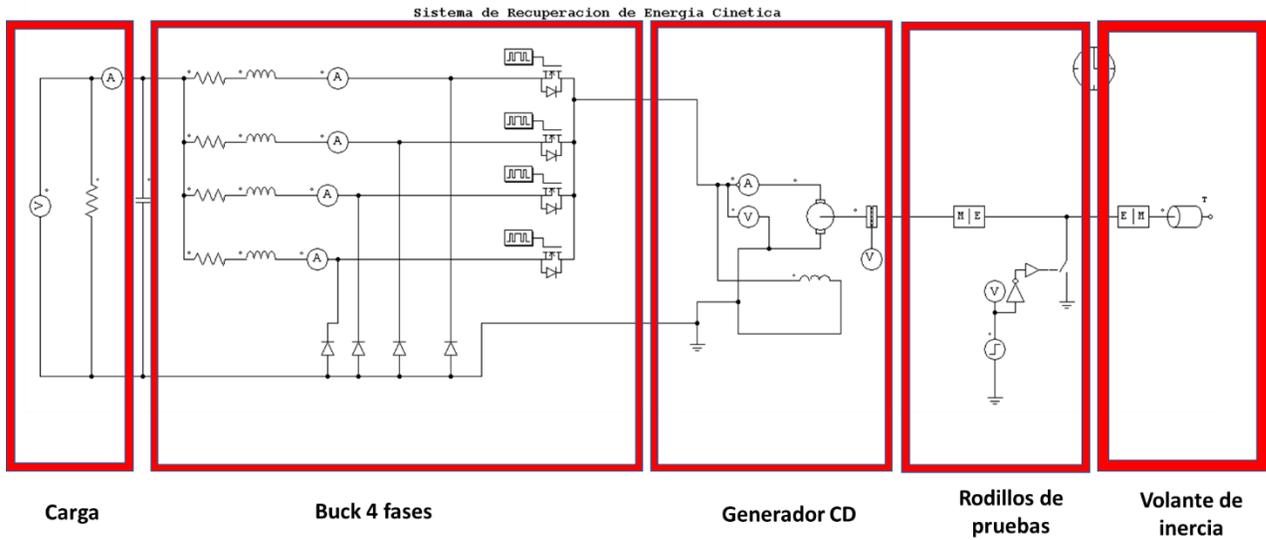


Figura 20. Esquemático del SIREC

En la Figura 21 se muestra el tiempo que el volante de inercia se detiene cuando transfiere la energía en condiciones que lo necesita el banco de baterías donde se propone que el convertidor será capaz de manejar 1000w. Esto durante una prueba que garantice la corriente de salida nominal de 40 A. sin embargo esta simulación se hace para ver cuál es la energía promedio que es más conveniente extraerle para mantener mayor tiempo la rotación y no desperdiciar energía

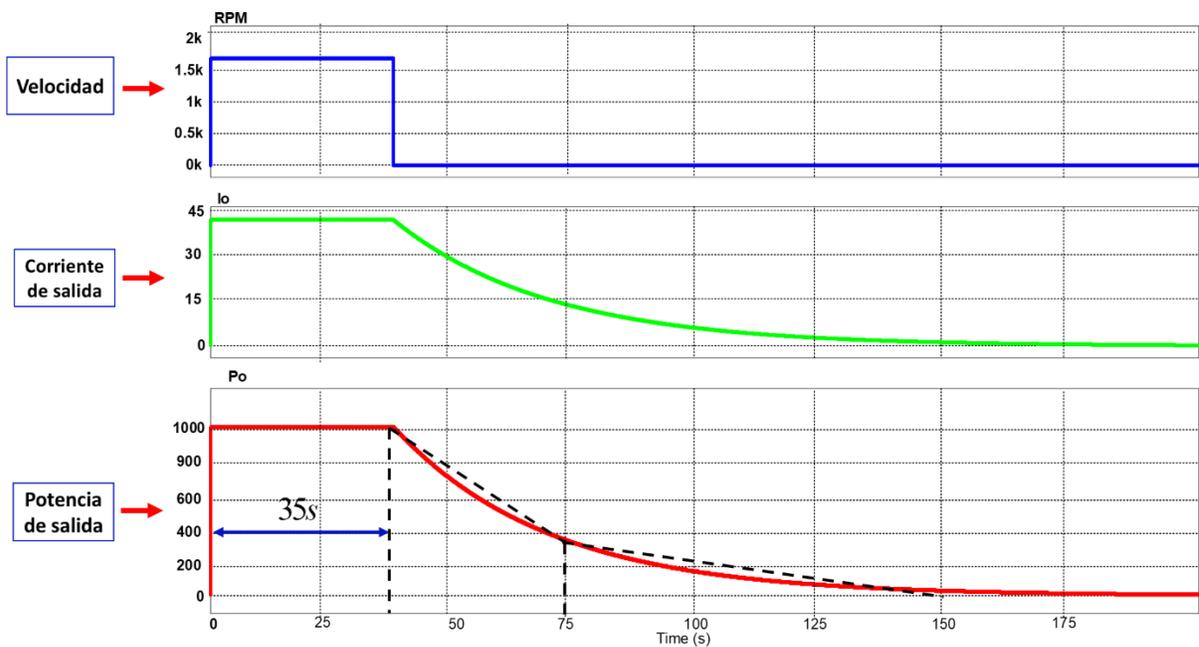


Figura 21. Manejo de energía del SIREC.

En base al análisis de la simulación anterior podemos definir cuanta energía se recupera en el SIREC. La siguiente expresión define a la energía.

$$Joules = Watts * Segundos \quad (23)$$

Se analiza la energía recuperada en dos etapas la primera es cuando se le puede extraer la energía directamente al proceso de pruebas al vehículo.

$$E_{rodillo} = \int_0^t P dt = E_V = \int_0^{35s} P dt = 1000w * 35s = 35000 \text{ joules} \quad (24)$$

En la segunda parte del análisis consiste en determinar cuanta energía es puede extraer al volante de inercia, por lo cual se consideró hacer el análisis de la energía considerando la potencia promedio que seria mas conveniente sacar al volante para mantener la rotación el mayor tiempo posible.

$$E_{volante} = \int_0^t P dt = E_V = \int_{35s}^{150s} P dt = 374w * 115s = 43,000 \text{ joules} \quad (25)$$

Sin embargo, la energía que nos interesa recuperar es solo la del volante de inercia esto debido a que extraer la energía directamente de la prueba afectara la dinámica de estas. Por lo que considerando las 720 pruebas que se realizan al día en la industria se puede recupera **30,967.200kJ**.

### 3.7 Conclusiones energéticas del SIREC.

La energía recuperada en un día es aproximadamente de 30967.200 kJ esto significa que la cantidad de energía que se recupera en un día es equivalente a **10 kW-hora**. Esta energía se almacena en el banco de baterías para ser ocupadas en actividades secundarias. Es importante considerar que se puede extraer mayor cantidad de energía considerando las dimensiones de volante sin embargo entre más grande sea este, las pruebas se aceleración y desaceleración tendrán que ser modificadas, lo cual no es conveniente para la industria.

---

## Capítulo 4

### Análisis y diseño de la topología Buck multifase

---

Este capítulo tiene el objetivo de presentar los aspectos fundamentales de la topología seleccionada; el convertidor *Buck* multifase asíncrono en modo de conducción continua (MCC) y diseñar un convertidor que permita transferir la energía con la mejor eficiencia y ante las variaciones e intermitencia de la fuente de entrada. Se presentan las características generales del convertidor, las ecuaciones de diseño, los cálculos de eficiencia y la validación por medio de simulaciones.

#### 4.1 Convertidor Buck multifase

Un convertidor Buck multifase son una serie de convertidores Buck idénticos puestos en paralelo. Cada uno de los convertidores puestos en paralelo es llamado “fases”. La finalidad de utilizar convertidores en paralelo es dividir la corriente total del circuito entre el número de fases; con esto, se reduce el tamaño de los elementos magnéticos, disminuyen las pérdidas en cada semiconductor, aumenta la eficiencia del convertidor y se tiene una respuesta dinámica más rápida, entre algunas otras ventajas. En la Figura 22 se muestra la estructura básica de un convertidor Buck asíncrono multifase.

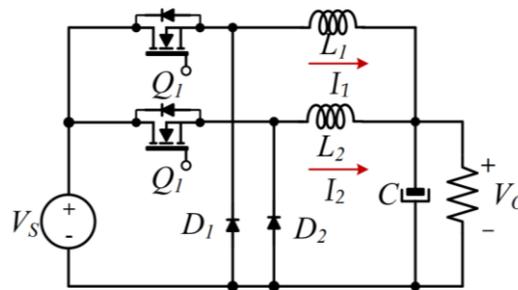


Figura 22. Topología del convertidor Buck multifase asíncrono.

Esta topología es utilizada para aplicaciones que requieren manejar altas corrientes a la carga y para estresar en menor medida los dispositivos, se divide la potencia, esto beneficia en mejorar el tiempo de vida útil de los dispositivos electrónicos

##### 4.1.1 Características del convertidor Buck multifase asíncrono

Las señales de control de cada rama están desfasadas  $\frac{360}{N}$ , donde N es el número de fases.

En la Figura 23 se muestra la topología básica de un convertidor reductor asíncrono multifase y sus señales de control.

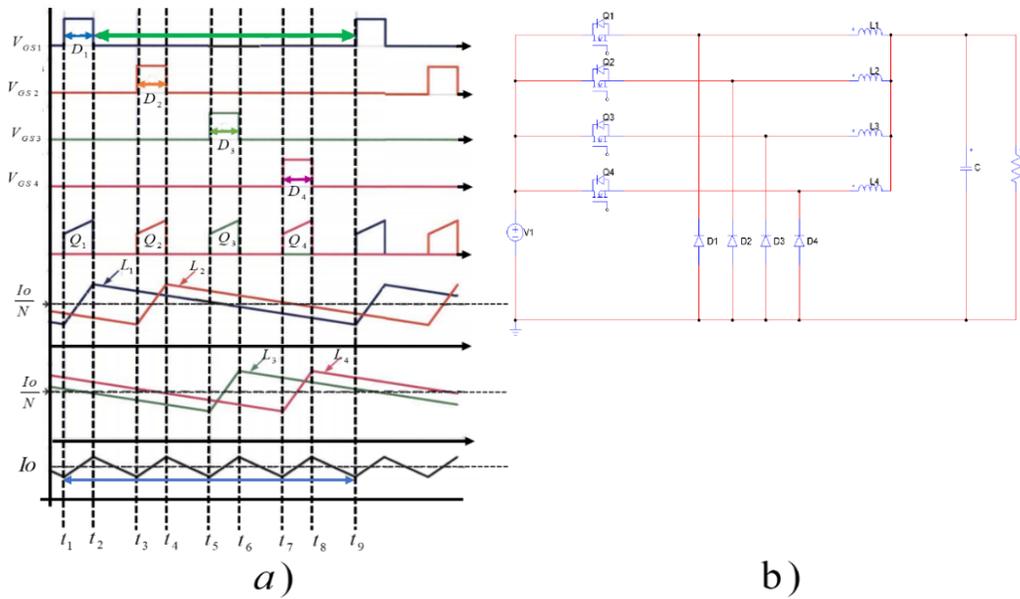


Figura 23. Convertidor multifase asíncrono a) señales de control y b) topología.

El convertidor Buck multifase tiene ventajas de operación para utilizarse como interfaz entre el generador de cd y el banco de baterías. Entre las cuales se encuentran:

*Disminución del tamaño de los inductores:* La corriente total del circuito se divide entre el número de fases del convertidor, de modo que la corriente que fluye por cada fase es una fracción de la corriente total, sin embargo, se consideran otros factores como la frecuencia, puesto que a mayor frecuencia de conmutación se disminuye el tamaño del inductor. Esto reduce el tamaño del inductor.

*Disminución del capacitor de salida:* El rizo de corriente en la salida tiene una frecuencia  $N$  veces mayor a la frecuencia de conmutación por lo que el capacitor se hace  $N$  veces más pequeño, en la salida. En la Figura 24 se observa que entre mayor es el número de fases el rizo de corriente  $I_o$  disminuye.

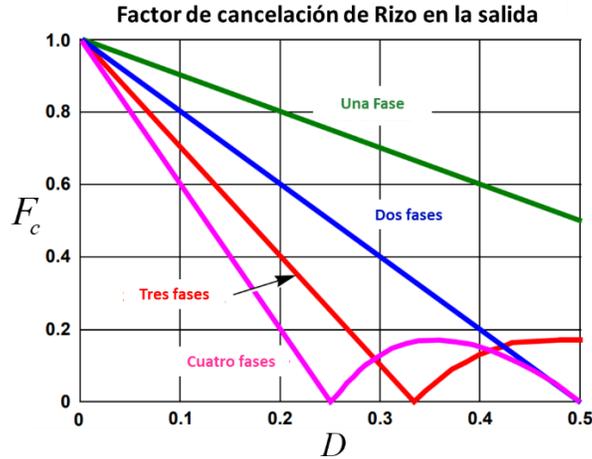


Figura 24. Gráfica de factor de cancelación de rizo en la salida.

*Aumento de frecuencia en la salida:* La frecuencia del rizo de corriente a la salida es  $N$  veces mayor a la de un solo convertidor como se observa en la Figura 25.

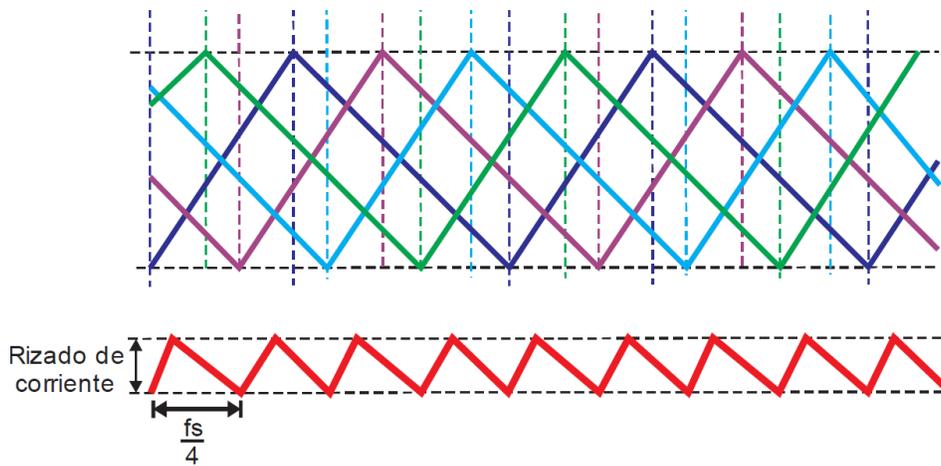


Figura 25. Aumento de frecuencia de rizo.

*Disminución del filtro en la entrada:* Al desfazar las señales de control, la corriente en la entrada deja de ser pulsante por lo que el valor RMS de la corriente es de menor valor con lo que se obtiene un capacitor de menor tamaño. Este fenómeno se conoce como factor de cancelación de rizo en la entrada.

El factor de cancelación de rizo en la entrada es un valor multiplicativo que está en función del ciclo de trabajo. En la Figura 26 se presenta un gráfico en donde se aprecia visualmente el valor del factor en función del ciclo de trabajo [38].

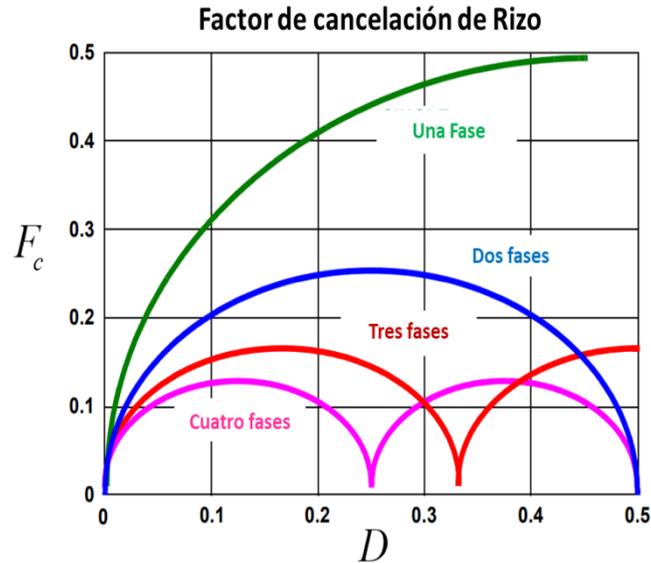


Figura 26. Factor de cancelación de rizo en la entrada.

*Disminución de pérdidas:* Debido a que la corriente que pasa por cada rama es una fracción de la corriente total, las pérdidas en los transistores y los inductores son menores, aparte se facilita la gestión térmica del transistor[37].

Algunos inconvenientes se presentan cuando las corrientes en cada una de las fases llegan a desbalancearse. El desbalance de corrientes se produce cuando los parásitos de cada una de las fases no son idénticos entre sí, lo que puede ocasionar que una fase lleve más corriente que otras, lo que lleva a tener más pérdidas en una fase y una reducción de la eficiencia [38].

#### 4.2 Análisis del convertidor de cuatro fases

En la Figura 27 se muestra el circuito eléctrico de un convertidor *Buck* de cuatro fases, en el cual se incluyen las resistencias serie de los inductores y del capacitor de salida. En el análisis del convertidor también se incluyen las resistencias de encendido de los interruptores y las resistencias de la pista [39].

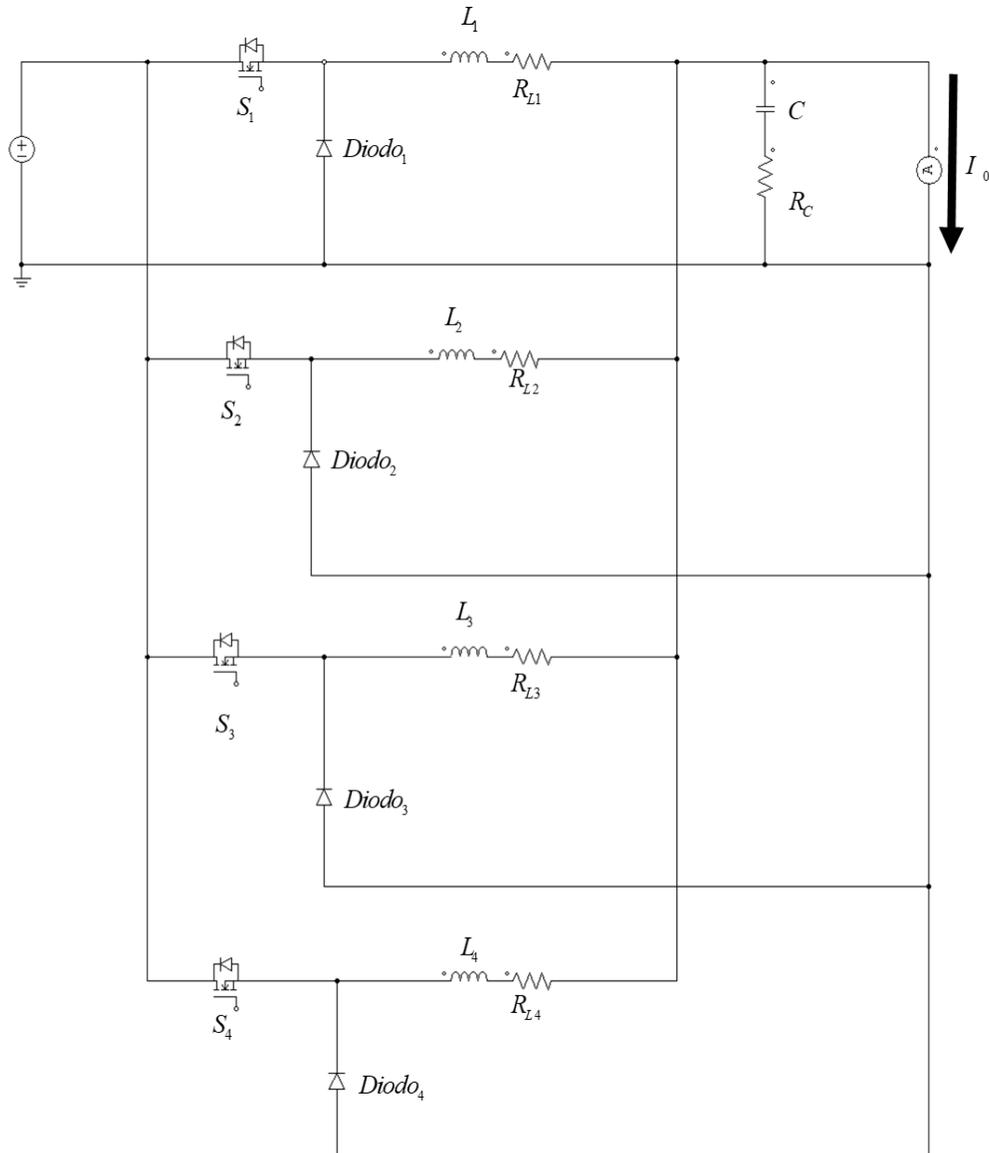


Figura 27. Convertidor Buck de cuatro fases.

El tiempo de encendido para los MOSFET's se muestran en la Figura 28. Para este análisis no se consideran traslapes en las señales de encendido. Además, estas señales de control se encuentran desfasadas  $90^\circ$ .

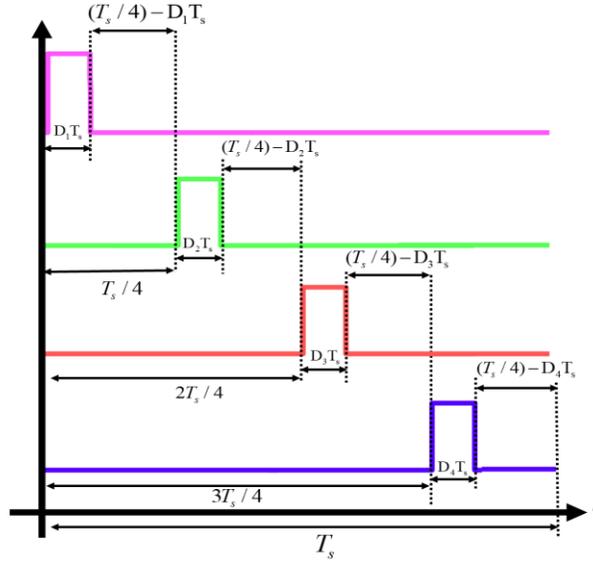


Figura 28. Tiempos de encendidos de los MOSFET's.

A partir del conjunto de ecuaciones obtenidas en cada estado de operación analizada en el **Anexo 1**, se utiliza la metodología de variable de estados promediados. Donde la siguiente expresión representa de manera generalizada las matrices de los estados promediados.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_o \end{bmatrix} = -A^{-1}BU$$

$$U = [V_{in} \quad I_o]^T$$

Esto con el fin de obtener las ecuaciones que definen las corrientes en cada una de las fases del convertidor y ver los parámetros que afectan el equilibrio de las corrientes por fase.

$$I_1 = \frac{V_{in} [R_3 R_4 (D_1 - D_2) + R_2 R_4 (D_1 - D_3) + R_2 R_3 (D_1 - D_4)] + I_o (R_2 R_3 R_4)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4} \quad (26)$$

$$I_2 = \frac{V_{in} [R_3 R_4 (D_2 - D_1) + R_1 R_4 (D_2 - D_3) + R_1 R_3 (D_2 - D_4)] + I_o (R_1 R_3 R_4)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4} \quad (27)$$

$$I_3 = \frac{V_{in} [R_2 R_4 (D_3 - D_1) + R_1 R_4 (D_3 - D_2) + R_1 R_2 (D_3 - D_4)] + I_o (R_1 R_2 R_4)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4} \quad (28)$$

$$I_4 = \frac{V_{in} [R_2 R_3 (D_4 - D_1) + R_1 R_3 (D_4 - D_2) + R_1 R_2 (D_4 - D_3)] + I_o (R_1 R_2 R_3)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4} \quad (29)$$

Para realizar el análisis, las variables de estado se definen como:

$$x_1 = i_{L_1} ; x_2 = i_{L_2} ; x_3 = i_{L_3} ; x_4 = i_{L_4} ; x_5 = V_c \quad (30)$$

Donde  $i_{L_1}, i_{L_2}, i_{L_3}, i_{L_4}$  son las corrientes en cada una de las fases que pasa por los inductores y  $V_c$  es el voltaje en el capacitor de salida.

Es importante simplificar algunas resistencias parásitas que son importante para el análisis del comportamiento de la corriente en cada una de las fases[40-42]. Por lo cual las expresiones se simplifican en:

$$R_1 = R_{L_1} + R_{DS1(on)} + R_{Pista} \quad ; \quad R_2 = R_{L_2} + R_{DS2(on)} + R_{Pista} \quad ; \quad R_3 = R_{L_3} + R_{DS3(on)} + R_{Pista}$$

$$R_4 = R_{L_4} + R_{DS4(on)} + R_{Pista}$$

### 4.3 Análisis de corrientes por fases.

Considerando las principales resistencias que afectan el comportamiento de las corrientes por fase se analizan las resistencias parásitas de los dispositivos seleccionados a una temperatura ambiente de 24 °C.

$$R = R_L + R_{DS(on)} + R_{Pista}$$

$$R = 45m\Omega + 220m\Omega + 5m\Omega$$

$$R = 270m\Omega$$

$$D = 27$$

Sin embargo, las temperaturas típicas de operación de los dispositivos serán entre los 24°C a 80°C, por lo cual es necesario observar el comportamiento de la resistencia  $R_{DS(on)}$  de los transistores, en la Figura 29 se observa el comportamiento de los MOSFET's seleccionados.

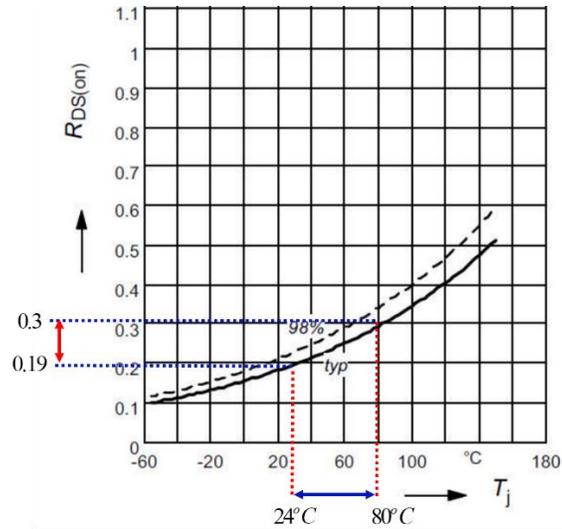


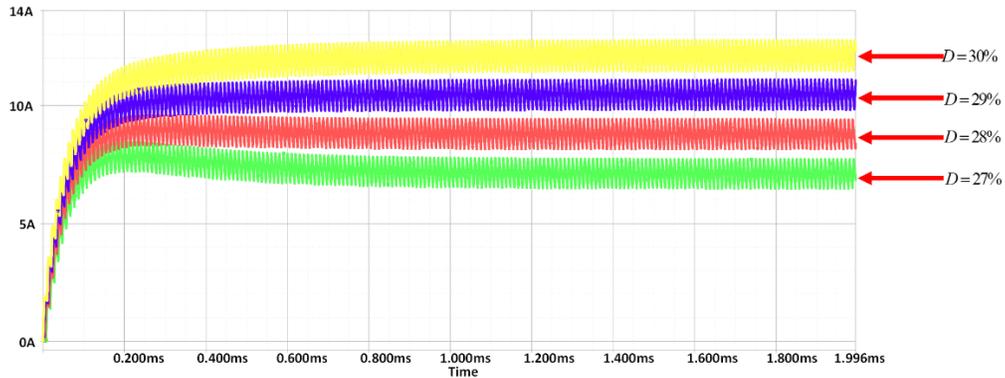
Figura 29. Comportamiento del  $R_{DS(on)}$  del MOSFET 20N60CFD.

Donde los cambios de resistencia entre la temperatura ambiente y las temperaturas de operación son muy abruptos como se observa en las siguientes expresiones:

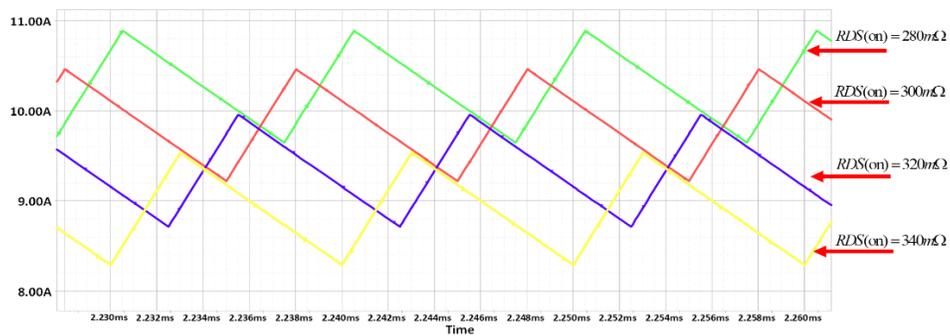
$$24^{\circ}C \rightarrow 0.19 \rightarrow 220\Omega \rightarrow \text{temperatura}_{\text{ambiente}}$$

$$80^{\circ}C \rightarrow 0.3 \rightarrow 350m\Omega \rightarrow \text{temperatura}_{\text{max}}$$

Es decir, las resistencias en conducción de los MOSFET's varían hasta en un 60% desde el punto de temperatura ambiente hasta el punto de temperatura máxima de operación de los transistores. Esto afecta de manera muy significativa la ecualización de las corrientes por fase. En la Figura 30 se analiza el desequilibrio de las corrientes variando los parámetros de ciclo de trabajo y resistencia parásitos que aparecen en las ecuaciones de las corrientes por fase.



a)



b)

Figura 30. Desequilibrio de corrientes por fase a) variando  $D$  y resistencias iguales y b) variando  $R_{DS(on)}$  con iguales ciclos de trabajo.

Este efecto de desequilibrio se agrava cuando los parámetros de las resistencias parasitas y las pequeñas variaciones del PWM se combinan, como se puede observar en la Figura 31, este efecto puede dañar o deteriora la vida de útil de los dispositivos semiconductores de la fase por donde está circulando una corriente mayor a la cual fue diseñada.

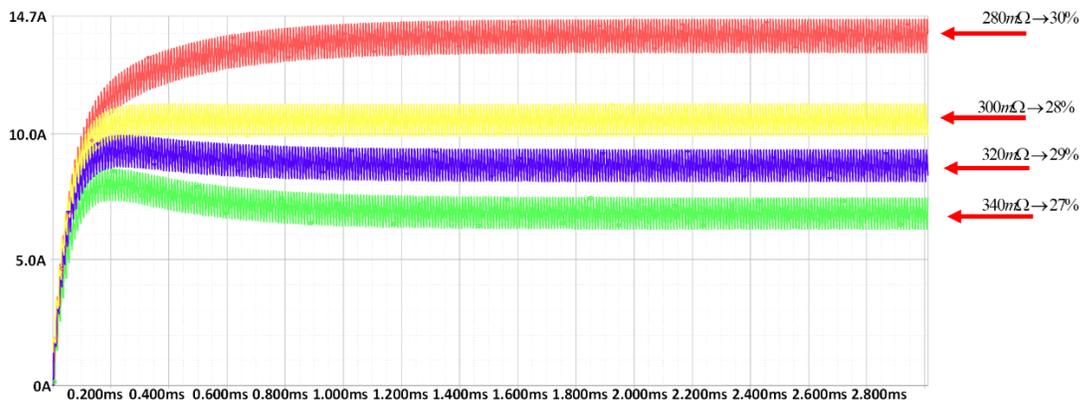


Figura 31. Desequilibrio de corriente en cada fase sumando los diferentes efectos de la  $R_{DS(on)}$  y los ciclos de trabajo.

Por lo cual se busca compensar el desequilibrio de corriente variando los ciclos de trabajo de manera que la corriente que fluye en cada conmutación sea igual en cada fase, este fenómeno se observa en la Figura 32. Esto se logra midiendo de manera indirecta la corriente con los valores de voltaje de los MOSFET's.

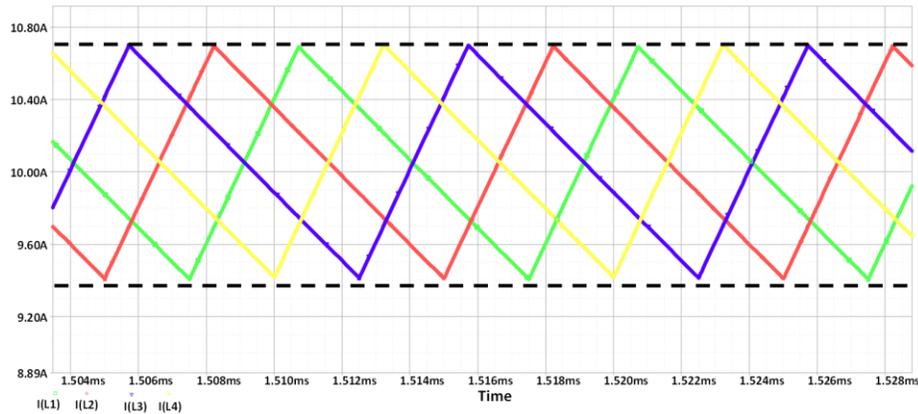


Figura 32. Corrientes ecualizadas variando el ciclo de trabajo.

Para concluir este ejercicio se muestra en la Figura 32 el principio de ecualización del integrado propuesto, para balancear la corriente en cada una de las fases.

#### 4.4 Ecuaciones de diseño del convertidor Buck multifase

El análisis de CD y las ecuaciones para el diseño del convertidor *Buck* multifase asíncrono en MCC se presentan en el **Anexo 2**. La distribución de la corriente por fase y el rizo de corriente esta determinada por las siguientes Ecuaciones 31 y 32.

$$I_{fase} = \frac{I_o}{N_{fases}} \quad (31)$$

$$\Delta_{I_{fase}} = a\% * I_{fases} \quad (32)$$

Donde  $I_{fase}$  es la corriente por fase,  $I_o$  es la corriente de salida del convertidor,  $N_{fases}$  es numero de fases y  $a\%$  es el porcentaje de rizo de corriente por cada fase que se propone por el diseñador. El rizo de voltaje a la salida del convertidor multifase se propone por el diseñador con la Ecuación 33.

$$\Delta_{v_o} = b\% v_o \quad (33)$$

Donde  $\Delta_{v_o}$  es rizo de voltaje por fase,  $v_o$  es el voltaje de salida del convertidor y  $b\%$  es el porcentaje de rizo de voltaje es el mismo para todas las fases.

Es importante mencionar que la frecuencia del capacitor a la salida es diferente a la frecuencia de conmutación a la que trabaja cada una de las fases, en la Ecuación 34 describe el cálculo de la frecuencia del capacitor.

$$f_{cap} = N_{fases} * fs \quad (34)$$

El tamaño del inductor por fase está expresada por la Ecuación 35.

$$L_{1,2,3,4} = \frac{(1-D)V_o}{\Delta_{I_{fase}} fs} \quad (35)$$

El tamaño del capacitor está expresada por la Ecuación 36 considerando que la frecuencia de salida en el capacitor es diferente a la frecuencia de conmutación de los mosfets.

$$C = \frac{v_o(1-D)}{32L\Delta_{v_o} fs^2} \quad (36)$$

La eficiencia del convertidor Buck multifase está dada por la ecuación 37.

$$n = \frac{P_o}{P_o + P_{multifase}} = \frac{P_o}{P_{in}} \quad (37)$$

$n$  es la eficiencia del convertidor

$P_o$  es la potencia de salida

$P_{multifase}$  son las pérdidas en el convertidor. Este término engloba las siguientes pérdidas:

- **MOSFET:** conducción, conmutación y carga y descarga de capacitancias parásitas.
- **Diodo:** conducción, conmutación y recuperación inversa.
- **Capacitor:** pérdidas en la resistencia parásita.
- **Inductor:** pérdidas en la resistencia parásita.
- **Impulsores:** pérdidas al encendido y al apagado.
- **Reguladores lineales:** pérdidas del regulador lineal.

#### 4.5 Parámetros del diseño

Los parámetros de diseño del convertidor son los requerimientos eléctricos del SIREC y del generador de imanes permanente. Sin embargo, para el diseño de un convertidor multifase existen parámetros importantes por proponer, estos son el número de fases y la frecuencia de conmutación. Generalmente, estos parámetros se definen por las capacidades de los controladores PWM. Sin embargo, ya que este proyecto de tesis tiene como objetivo obtener un convertidor con una eficiencia superior al 90% y un buen manejo de la densidad de potencia, se realizó una selección de componentes en base a estas características.

##### 4.5.1 Frecuencia de conmutación

Para seleccionar la frecuencia de conmutación del convertidor es importante considerar la potencia que se puede extraer del generador de imanes permanentes durante las pruebas realizadas en los rodillos de aceleración y desaceleración, la cual varía entre 700 W y 1000 W. El convertidor debe estar en MCC en todo el rango de potencia. Para cada valor de frecuencia de conmutación existe un valor de inductancia que permite la operación del convertidor en MCC en todo el rango de potencia. Ya que no se conoce el número de fases que tendrá el convertidor se calcula el valor de inductor que satisface esta demanda con un convertidor Buck de una fase.

En la Tabla 13 se realiza un análisis de las diferentes frecuencias para calcular un inductor comercial y viable considerando el presupuesto del proyecto.

*Tabla 13. Selección de frecuencia e inductor para el convertidor multifase.*

<b>Valor de inductores (uH)</b>		
Frecuencia de conmutación	Buck 4 fases	Buck convencional
<b>50kHz</b>	300	1200
<b>100kHz</b>	150	600
<b>150kHz</b>	101	405
<b>200kHz</b>	76	305
<b>250kHz</b>	60	240

El inductor seleccionado tiene un valor de inductancia de 150 uH. Por tanto, se selecciona la frecuencia de conmutación de 100 kHz, ya que con este inductor se puede manejar la máxima densidad de potencia proporcionada por el SIREC.

#### 4.5.2 Número de fases

En base a la revisión del estado del arte y considerado los ciclos de trabajos en los que opera el convertidor se determinó el número de fases. En la Tabla 14 se observan los ciclos de trabajos en los que opera el convertidor multifase.

Tabla 14. Ciclos de trabajos en diferentes condiciones de entrada del convertidor.

Voltaje del generador ( $V_{in}$ )	Salida de voltaje al banco de baterías ( $V_o$ )	Ciclo de trabajo (D)
75	24	0.32
80	24	0.30
85	24	0.28
90	24	0.26
95	24	0.25
100	24	0.24

Como se mencionó anteriormente en el capítulo dos, una de las características del convertidor multifase es disminuir el rizo de corriente a la salida por lo que en base a la Tabla 15 se seleccionó el número de fases. En la Figura 33 se describe el rango donde se trabajan los ciclos de trabajo para este convertidor.

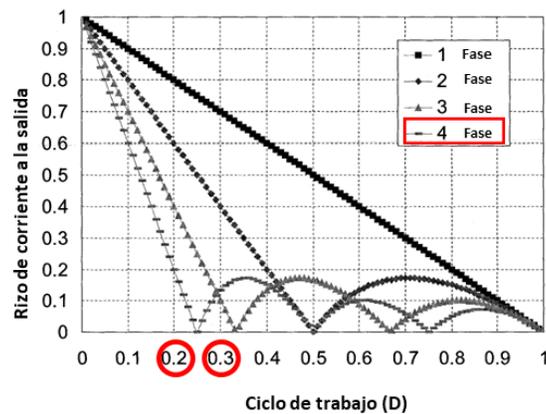


Figura 33. Selección de número de fases para el convertidor multifase.

En base a la Figura 33 se concluyó que el número de fases mínimo para mantener el beneficio de la reducción del rizo de corriente, operando en el rango de ciclos de trabajo descrito en la Tabla 14, son de cuatro fases.

### 4.5.3 Conclusiones de diseño del convertidor CD-CD

En conclusión, se presentan los valores de los parámetros de diseño del convertidor definido en los siguientes tres puntos:

- Se diseñarán un convertidor *Buck* multifase de 4 fases operando en MCC.
- El convertidor se diseña a una potencia de 1 kW.
- El control PWM se implementará con el circuito integrado ISL6558.

En el diagrama de la Figura 34 se observa la configuración del convertidor de potencia acoplado con el sistema de almacenamiento de energía.

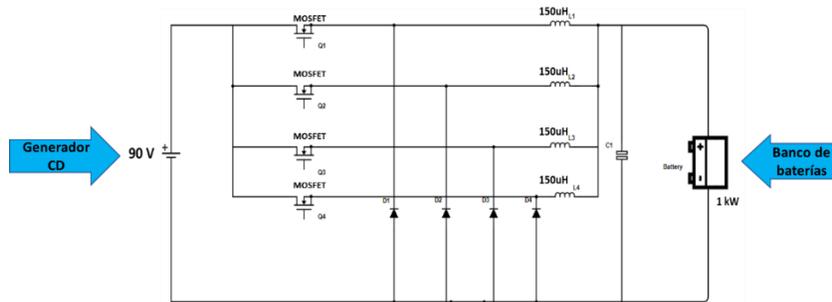


Figura 34. Topología Buck multifase de 4 fases seleccionado para el SIREC.

Los parámetros de diseño de cada convertidor se presentan en la Tabla 15, considerando las características de operación del SIREC.

Tabla 15. Parámetros de implementación para la topología multifase

Símbolo	Definición	Valor
$P_o$	Potencia	400-1000 W
$V_o$	Voltaje que requiere el banco de baterías	24 V
$V_{in}$	Voltaje del generador de CD	40-100 V
$f_s$	Frecuencia de conmutación	100 kHz
$N_{fases}$	Numero de fases	4 fases

### 4.6 Selección de componentes para el convertidor CD-CD

Con el propósito de construir un prototipo capaz de manejar una alta densidad de potencia, considerando los costos de tecnología a la que se puede acceder. A continuación, se presentan en Tabla 16 los componentes seleccionados.

Tabla 16. Dispositivos seleccionados y sus características

Dispositivo	Tecnología	Valor del dispositivo	Voltaje de operación	Resistencia parásita	Corriente máxima	Tiempos de retardo	Dimensiones	Temperatura de operación
			(V)	( $\Omega$ )	(A)	(s)	(mm)	( $^{\circ}$ C)
Inductor 1140-151-RC	****	150uH	***	40m	11.5	***	38.1*26.1	-55 a 105
Capacitor	Polipropileno	1uF	200	29.5m	50	***	32*13*23	-30 a 105
MOSFET C20N60CFD	coolMOS	***	400	220m	20	***	14*17*5	-55 a 155
Diodo TO-220-L	Carburo de silicio	***	200	65m	20	***	8*13*4	-40 a 175
PWM ISL6558	SOIC	100kHz	5	****	****	****	2*6*1.5	-40 a 85
Driver MIC4451	BICMOS/DMOS	***	5-18	***	12	30n	8*10*5	-45 a 85
Regulador LM340T5	monolíticos	***	12-15	***	1A	***	8*12*5	-30 a 85

### 4.7 Diseño del convertidor considerando elementos parásitos en simulación

En la Figura 35 se presenta el diagrama del convertidor con los elementos parásitos de sus componentes.

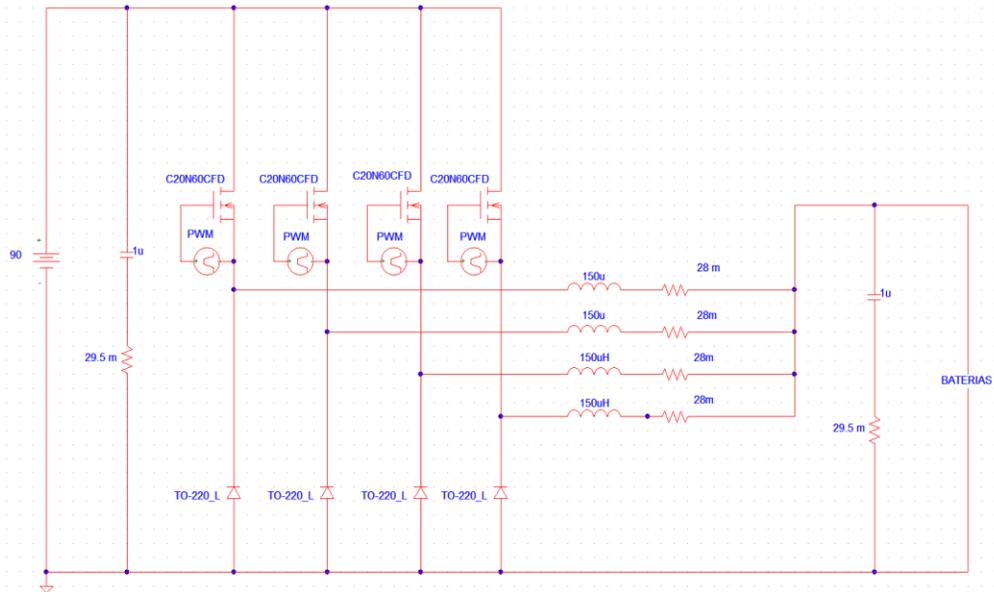


Figura 35. Diseño de topología considerando elementos parásitos en OrCAD Pspice.

El valor de los elementos parásitos de los diferentes componentes del convertidor se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Elementos parásitos.

Componentes	Valor de elementos parásitos
MOSFET	$R_{DS(ON)} = 95m\Omega$
Inductor	$R_L = 28m\Omega$
Capacitor	$ESR = 29.5m\Omega$
Driver	$RETARDO = 30ns$
Optoacopladores	$RETARDO = 100ns$

En la siguiente Tabla 18 se presenta los parámetros de diseño del convertidor multifase, considerando las ecuaciones de diseño anteriormente mencionadas.

Tabla 18. Parámetros de diseño del convertidor multifase.

Parámetros	Valores
Voltaje de entrada	$V_{in} = 90V$
Corriente de entrada	$I_{in} = 11.55A$
Rizo de corriente de entrada	$\Delta_{in} = 9.5A$
Ganancia	$M = 0.266$
Ciclo de trabajo	$D = 0.27$
Resistencia de carga	$R_o = 0.58\Omega$
Corriente total	$I_o = 42A$
Corriente por fase	$I_{fase} = 10.5A$
Rizo de corriente por fase	$\Delta_{fase} = 1A$
Frecuencia del capacitor	$f_{s_{cap}} = 400kHz$
Rizo de corriente a la salida	$\Delta_{fase} = 0.2A$
Rizo de voltaje a la salida	$\Delta_V = 0.1V$

#### 4.7.1 Simulación

En esta sección se presenta el cálculo de la eficiencia teórica del convertidor utilizando el análisis de la topología con ayuda del simulador OrCAD Pspice, en el cual se vacían los valores de elementos parásitos dentro del modelo de pérdidas del convertidor, sin considerar el desequilibrio de corrientes.

#### 4.7.2 Simulación del convertidor con dispositivos reales

El esquemático de la topología se presentó anteriormente en la Figura 35. A continuación, en la Figura 36 se presenta la modulación PWM que se utilizó en esta simulación para encender los MOSFET's, considerando el número de fases ( $\frac{360^\circ}{4 \text{ fases}}$ ) y la frecuencia de conmutación.

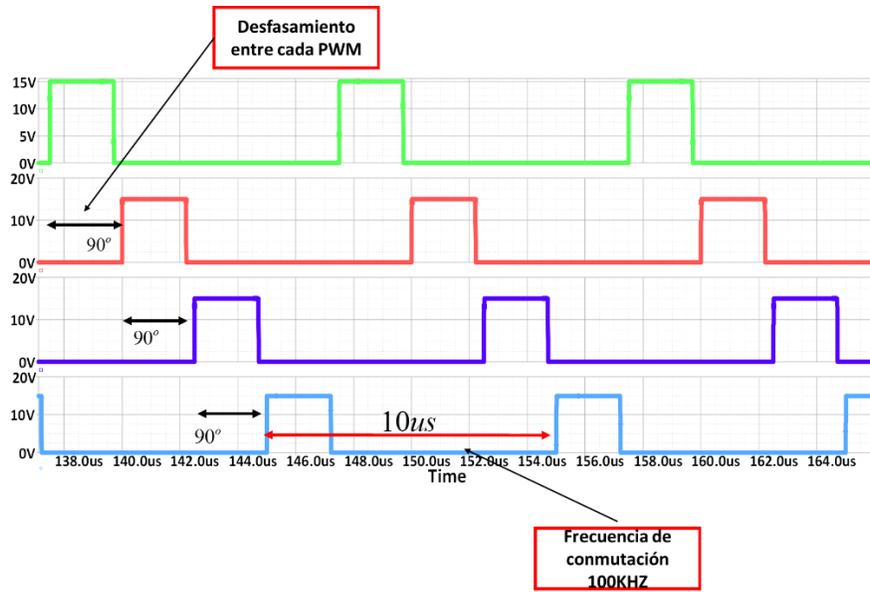


Figura 36. Modulación PWM de la topología multifase en OrCAD Pspice.

En las Figuras 36 y 37 se analizan el comportamiento dinámico del voltaje y su rizo de voltaje en la salida del convertidor.

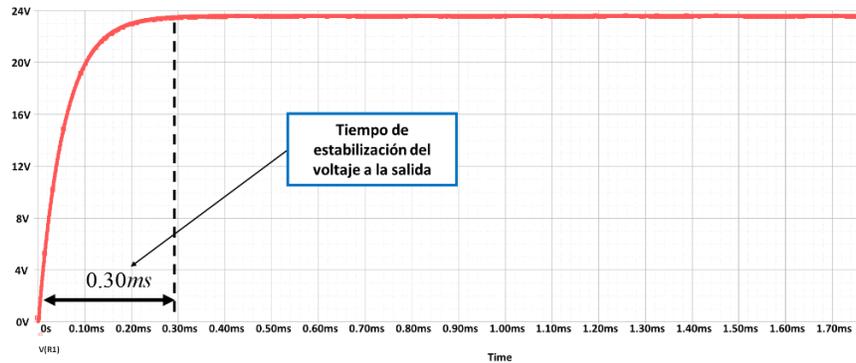


Figura 37. Voltaje de salida del convertidor multifase.

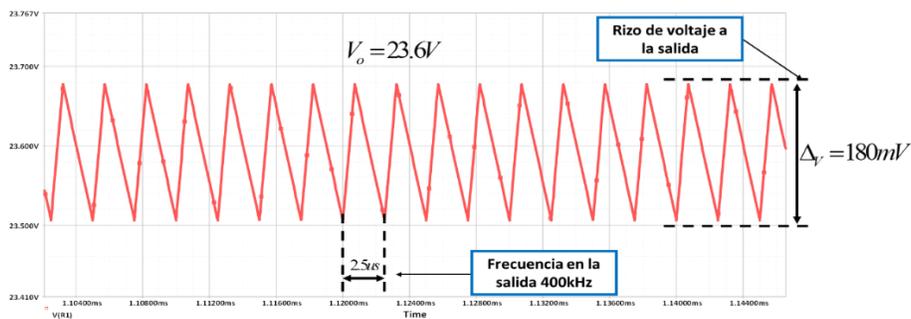


Figura 38. Rizo de voltaje de salida del convertidor multifase.

Es importante ver la respuesta de la corriente al momento de la demanda en la carga, así como su tiempo de estabilización como se muestra en la Figura 39. En la Figura 40 se observa el rizo de corriente que se le entrega al banco de baterías.

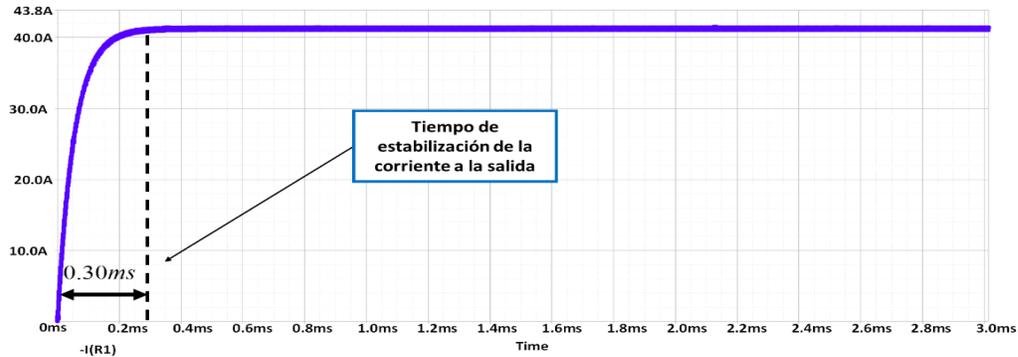


Figura 39. Corriente de salida del convertidor multifase.

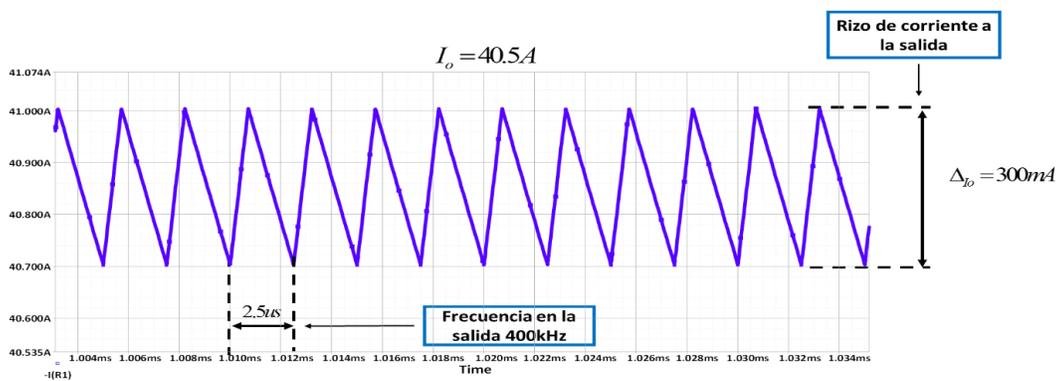


Figura 40. Rizo de corriente de salida del convertidor multifase.

Las topologías Buck demanda una corriente pulsante a la entrada del convertidor, este efecto puede ser dañino para el bus de CD, en este caso el generador de CD, la ventaja de la topología multifase es que reduce esa corriente pulsante en comparación con la topología convencional, este efecto se puede apreciar en la Figura 41.

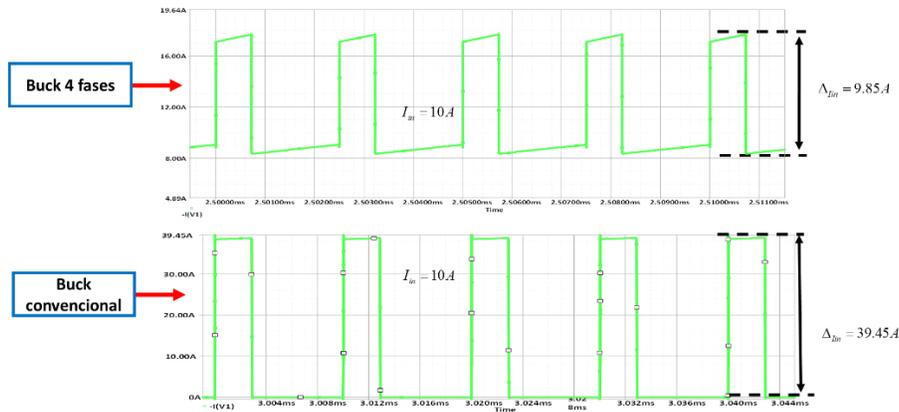


Figura 41. Corriente pulsante en la entrada del convertidor Buck 4 fases y Buck convencional.

Las corrientes en cada fase son importantes que se encuentre ecualizadas debido a que afectan directamente a la eficiencia del convertidor, esto debido a que cuando circula mayor corriente por una fase los dispositivos discretos tendrán que disipar mayor energía y se presentarán mayores pérdidas de conmutación en esa fase. En la Figura 42 se observa las corrientes ecualizadas en cada fase.

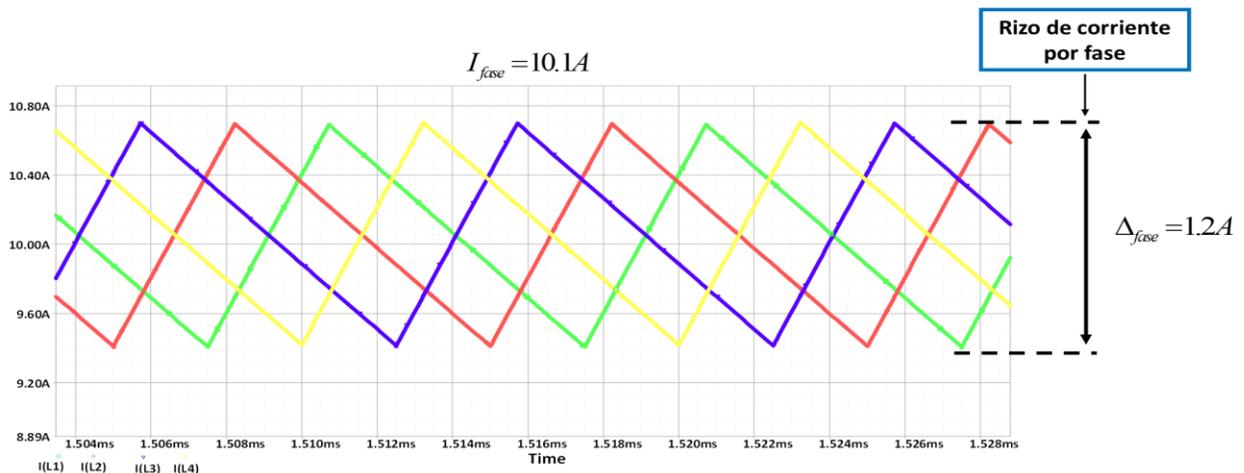


Figura 42. Rizo de Corriente en cada fase del convertidor.

Es importante el análisis del esfuerzo de corrientes que sufre cada transistor, debido a que son dispositivos grandes cantidad de pérdidas por conmutación. Sin embargo, gracias a los beneficios de esta topología las pérdidas son menos impactantes, puesto que la división de corriente total entre el número de fases, provoca menos estrés térmico y trabaja a una frecuencia menor a la que requiera la salida del convertidor. En la Figura 43 se observa las corrientes que circulan en cada transistor.

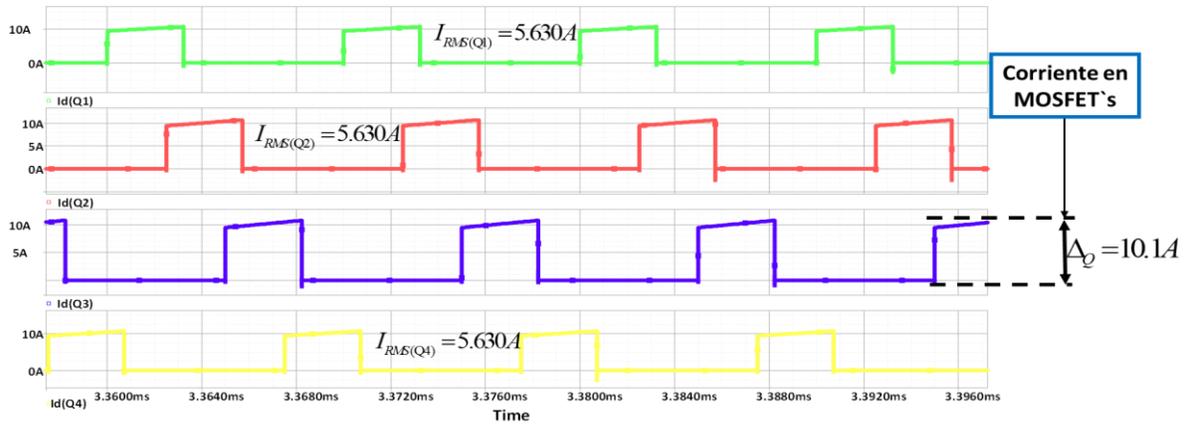


Figura 43. Manejo de corriente en cada MOSFET.

Se analizó el esfuerzo de corriente que presenta los diodos en cada fase como se observa en la Figura 44, esto con el fin de una buena selección de dispositivo que sea capaz de soportar esas condiciones mostradas. Debido a que la tecnología que se implementa en los diodos es de Carburo de Silicio su tiempo de recuperación inversa es prácticamente cero.

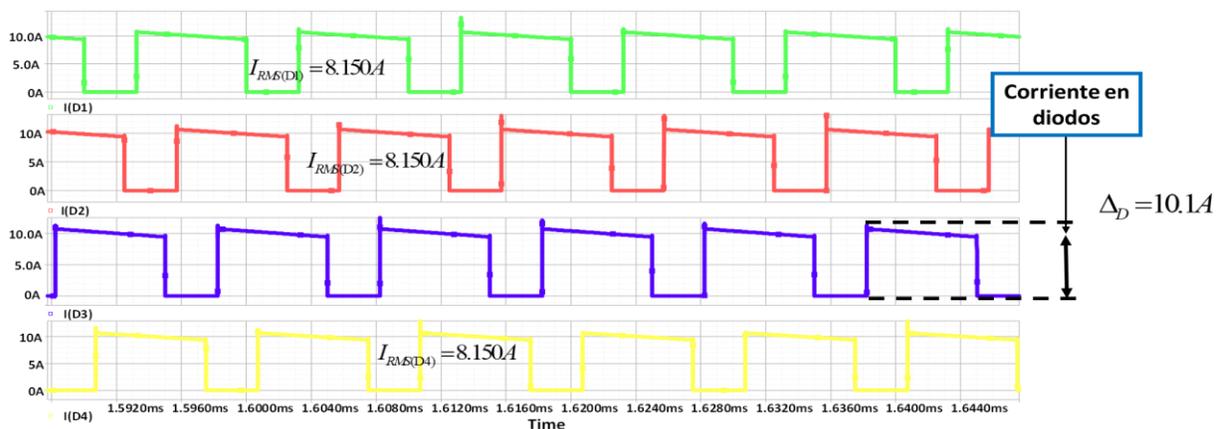


Figura 44. Manejo de corriente en cada Diodo.

### 4.7.3 Validación del diseño

Con el fin de validar el diseño del convertidor con el simulador, se realiza una comparación entre los valores calculados y los valores obtenidos en el simulador. Los valores comparados en simulación del convertidor se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Comparación entre los valores calculados y valores obtenidos en el simulador.

Parámetros	Valores	
	Calculados	Simulados
Corriente de entrada	$I_{in} = 10A$	$I_{in} = 10A$
Rizo de corriente de entrada	$\Delta_{in} = 9.5A$	$\Delta_{in} = 9.85A$
Corriente total	$I_o = 42A$	$I_o = 40.5A$
Corriente por fase	$I_{fase} = 10.5A$	$I_{fase} = 10.1A$
Rizo de corriente por fase	$\Delta_{fase} = 1A$	$\Delta_{fase} = 1.2A$
Frecuencia del capacitor	$f_{s_{cap}} = 400kHz$	$f_{s_{cap}} = 400kHz$
Rizo de corriente a la salida	$\Delta_{Io} = 0.2A$	$\Delta_{Io} = 0.3A$
Corriente pico en MOSFET	$I_{pico(Q)} = 10A$	$I_{pico(Q)} = 10.1A$
Corriente pico en diodo	$I_{pico(Q)} = 10A$	$I_{pico(Q)} = 10.1A$
Rizo de voltaje a la salida	$\Delta_V = 150mV$	$\Delta_V = 180mV$

Todos los valores simulados fueron comparados, concluyendo que existen pequeñas variaciones entre los valores calculados y en simulación, sin embargo, las diferencias son poco significantes. Por tal, se valida el diseño del convertidor.

#### 4.7.4 Análisis de eficiencia teórica en base a simulación

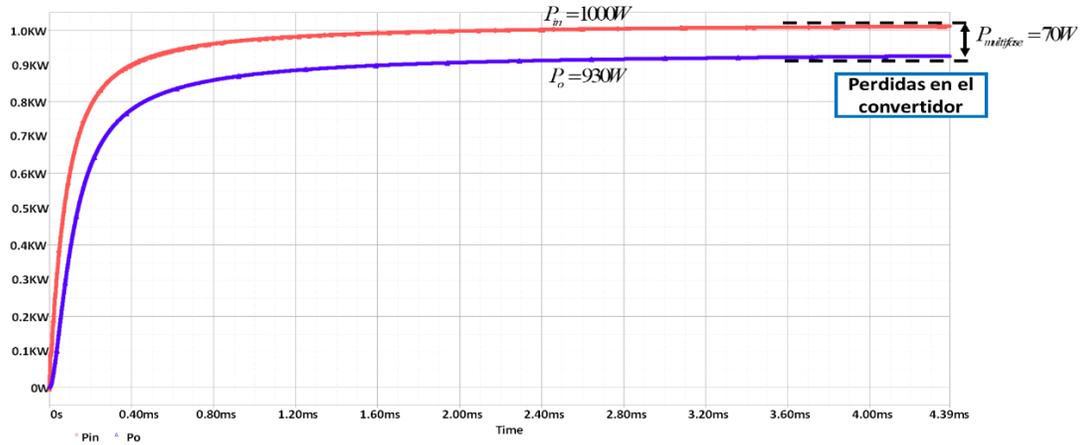
La eficiencia del convertidor se obtiene a través de la siguiente expresión.

$$n = \frac{100P_o}{P_o + P_{multifase}} = \frac{100P_o}{P_{in}}$$

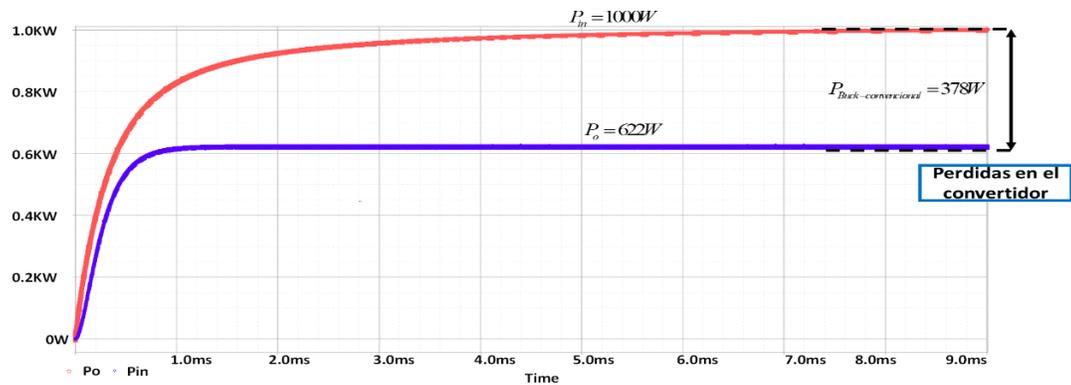
Donde el termino  $P_{multifase}$  considera los siguientes valores de pérdidas

$$P_{multifase} = N * (P_{perdidas\_MOSFET} + P_{perdidas\_Diodo} + P_{Perdida\_inductor}) + P_{Perdida\_capacitor\_entrada} + P_{Perdida\_capacitor\_salida}$$

Se observa el valor de eficiencia del convertidor multifase a la potencia de diseño de 1000 W. El valor de eficiencia que presenta es de 93%, estos datos fueron analizados en el simulador OrCAD Pspice. Mientras que para la topología del Buck convencional sometido a los mismos parásitos resistivos y a las mismas características del convertidor multifase es decir una frecuencia de 400kHz a la salida, con una potencia de entrada de 1000W las pérdidas de conmutación se hacen más significantes puesto que se estresa más el dispositivo MOSFET. En la Figura 45 se observa la comparación de eficiencias entre la topología multifase y la topología convencional.



a)



b)

Figura 45. Pérdidas de las topologías en el simulador OrCAD Pspice a) Buck cuatro fases y b) Buck convencional.

Los valores de eficiencia calculados serán corroborados con el prototipo experimental. Concluido la etapa de diseño y de cálculo de la eficiencia teórica se procede a realizar el diseño de la tarjeta electrónica.

---

## Capítulo 5

### Implementación y resultados experimentales

---

Este capítulo tiene como objetivo presentar la implementación del prototipo experimental del convertidor de potencia. Se define un protocolo de pruebas y se presentan las diferentes pruebas realizadas en laboratorio y resultados obtenidos. En base a estos resultados se realiza un análisis de operación del SIREC.

### 5.1 Prototipo

La tarjeta electrónica diseñada e implementada en los laboratorios de cenidet de manera tradicional para comprobar la funcionalidad del prototipo. El convertidor fue diseñado para optimizar el área de la tarjeta electrónica esto se puede observar en el **Anexo 3**. En la Figura 46 se muestra el esquema que conforma cada parte de la implementación.

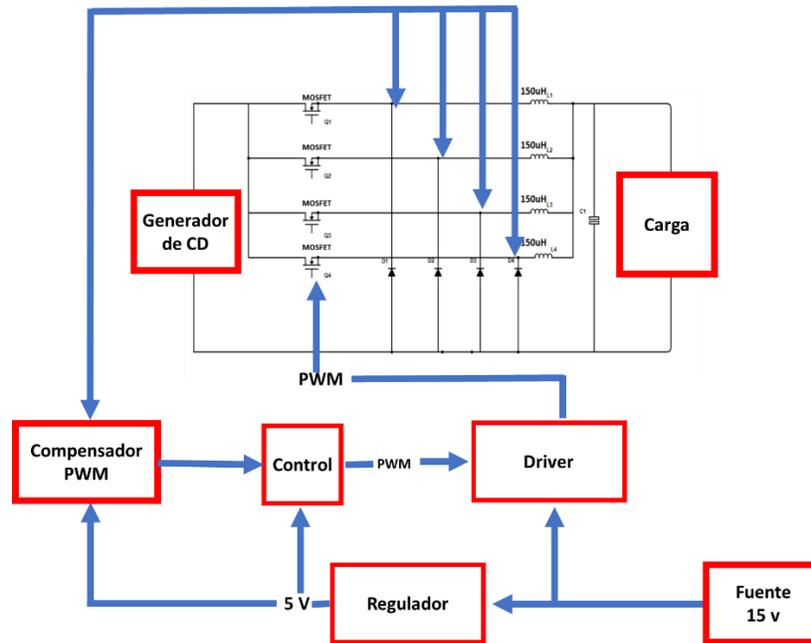


Figura 46. Esquema de implementación del convertidor.

En la Figura 47 se presenta la implementación de la tarjeta electrónica con los componentes y las fuentes que auxiliaron para realizar las diferentes pruebas de funcionalidad del convertidor.

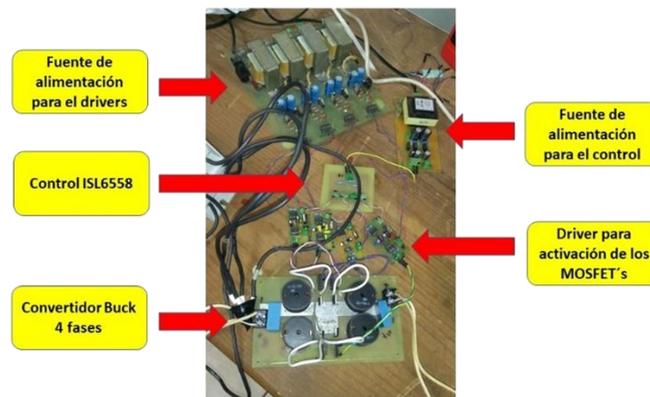


Figura 47. Implementación del convertidor.

### 5.2 Definición de Protocolo de pruebas

Con el fin de validar el diseño del convertidor de forma experimental se define un protocolo de pruebas, a continuación, se define los objetivos generales y específicos de este protocolo de pruebas, considerando los parámetros definidos en la Figura 48.

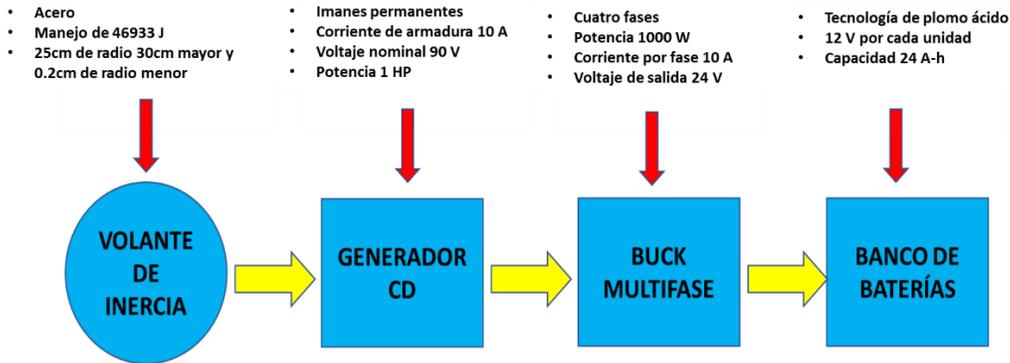


Figura 48. Diagrama del SIREC con la conexión del Buck multifase.

**Objetivo general:** Se requiere hacer mediciones típicas de eficiencia y equalización de corrientes en base a la potencia nominal del convertidor y a la energía capaz de proporcionar el SIREC. En la Tabla 20 se definen los principales parámetros a variar dependiendo el tipo de prueba que se realice.

Tabla 20. Variación de parámetros principales y valores nominales

Variación de parámetros	Símbolo	Unidad	Valor Nominal	Valores variados
Potencia de salida	$P_o$	[W]	1000	400 a 1000
Voltaje de entrada	$V_i$	[V]	100	40 a 100
Voltaje de salida	$V_o$	[V]	24	18 a 24

**Objetivos específicos:**

- Probar el funcionamiento del convertidor a máximo 1kW de potencia de salida.
- Medir la eficiencia del convertidor a 1 kW.
- Observar el comportamiento de las corrientes en cada fase
- Observar el comportamiento de la corriente de salida
- Observar el comportamiento de la corriente en la entrada del convertidor.
- Analizar temperaturas en los dispositivos discretos

En la Tabla 21 se presenta los parámetros secundarios que se variaran dependiendo las pruebas y las condiciones que se requiere para validar la funcionalidad del convertidor.

Tabla 21. Variación de parámetros secundarios

Variación de parámetros	Símbolo	Unidad	Valor Nominal	Valores variados
Corriente de salida	$I_o$	[A]	40	20-40
Corriente de entrada	$I_{in}$	[A]	10	4-10
Ciclo Trabajo	$D$	[-]	0.24	0.24-0.6
Voltaje de salida	$V_o$	[V]	24	18-24
Potencia de entrada	$P_{in}$	[W]	1000	400-1000

La importancia de manejar equipos que se encuentren calibrados es fundamental para realizar las mediciones con mayor precisión posible, en la Tabla 22 se describen los equipos requeridos para validar la funcionalidad del convertidor.

Tabla 22. Equipo requerido para realizar diferentes pruebas

Equipo	Marca	Modelo	Serie
Fuente de CD	MAGNA POWER	TS 250-40	1161-6360
Cargas resistivas	BK PRECISION	8540	182H16103
Banco de baterías	Genesis	Acido plomo	*****
Osciloscopio	TEKTRONIX	DPO 3054	C030772
Sonda diferencial	TEKTRONIX	P5205A	C024755
Adaptador	TEKTRONIX	TPA-BNC	C028663
Sonda diferencial	TEKTRONIX	P5205	B031948
Adaptador	TEKTRONIX	TPA-BNC	C028749
Sonda diferencial	TEKTRONIX	P5205	B030868
Adaptador	TEKTRONIX	TPA-BNC	C028790
Sonda de corriente	TEKTRONIX	TCP0030A	C001625
Sonda de corriente	TEKTRONIX	TCP0030A	C001624
Sonda de corriente	TEKTRONIX	TCP0020	C000999
Sonda de corriente	TEKTRONIX	TCP0020	C000994
Termómetro IR	FLUKE	62 mini	*****
Fuente de CD	Magna-Power	TS 500-40	1161-6584
Cámara termográfica	FLIR	Modelo E5	*****

**Pruebas por realizar:**

1. Probar la funcionalidad del control ISL6458.
2. Probar la corriente en cada fase en diferentes potencias
3. Analizar la temperatura de los dispositivos discretos
4. Medir eficiencia del convertidor.
5. Análisis de operación del convertidor en diferentes condiciones del SIREC.

En Tabla 23 se describe cada una de las pruebas que se realizaron para validar el funcionamiento del convertidor considerando diferentes condiciones de potencia, voltaje y corriente en la salida del convertidor.

*Tabla 23. Descripción del protocolo de pruebas.*

<b>No. de prueba</b>	<b>Descripción de la prueba</b>	<b>Pruebas por realizar</b>
1	Conexión del circuito integrado ISL6558	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificación de las señales de conmutación.</li> <li>2. Revisión de la frecuencia de conmutación.</li> <li>3. Variación del ciclo de trabajo.</li> <li>4. Revisión de los pulsos de control y su desfase.</li> <li>5. Conexión del control con los impulsores.</li> <li>6. Conexión del circuito para su operación.</li> </ol>
2	Conexión de lazos de ecualización del control ISL6568	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Revisión de las señales de control.</li> <li>2. Variación de potencias de entrada y salida.</li> <li>3. Revisión de corrientes por fase.</li> </ol>
3	Medir temperaturas en dispositivos discretos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Realizar medidas de temperaturas en dispositivos discretos bajo las mismas condiciones de operación y variando las potencias con corrientes desecualizadas.</li> <li>2. Repetir la prueba 1 pero con las corrientes ecualizadas.</li> </ol>

4	Pruebas de eficiencia	1. Revisión de la eficiencia del convertidor a plena carga.
5	Operación del convertidor en condiciones requeridas por el SIREC.	1. Medición de corrientes y voltajes en la salida. 2. Medición de eficiencias en diferentes condiciones de operación.

### 5.3 Pruebas por realizar

Las pruebas se realizan en diferentes puntos del convertidor como se muestra en la Figura 49, esto con la finalidad de obtener los parámetros secundarios como potencia de entrada y potencia de salida.

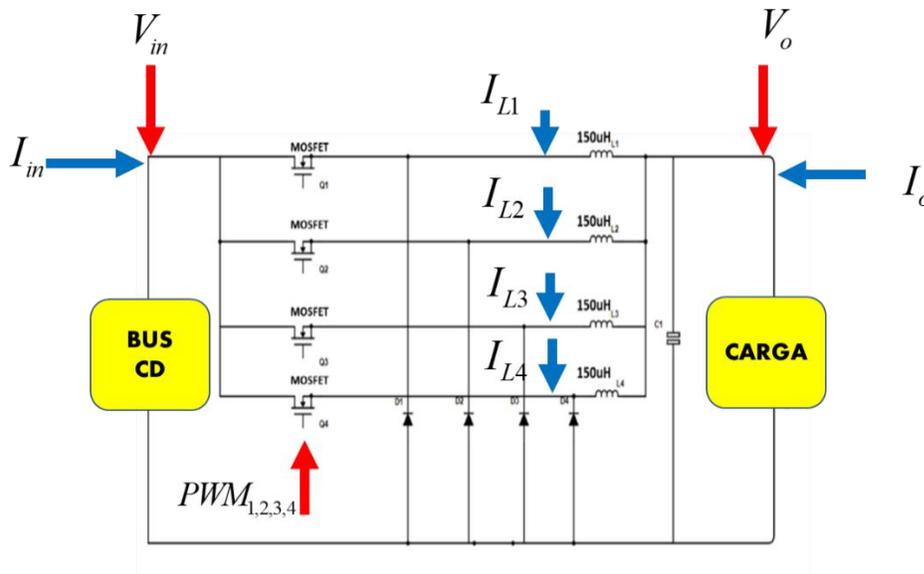


Figura 49. Puntos de pruebas en el convertidor.

Es importante sacar esas mediciones primarias para realizar un análisis de medidas secundarias como es el caso de la eficiencia, la potencia entrada y potencia de salida. Para sacar conclusiones de implementación y corroborar datos de simulación.

#### 5.3.1 Pruebas al integrado ISL6558 e impulsores

Esta prueba consiste en la revisión del circuito integrado ISL6558. El circuito integrado genera las señales de control PWM para cada convertidor *Buck* de 4 fases. Las señales de control tienen un desfase de 90°. El diagrama de conexión del circuito integrado para realizar esta prueba se presenta en la Figura 50.

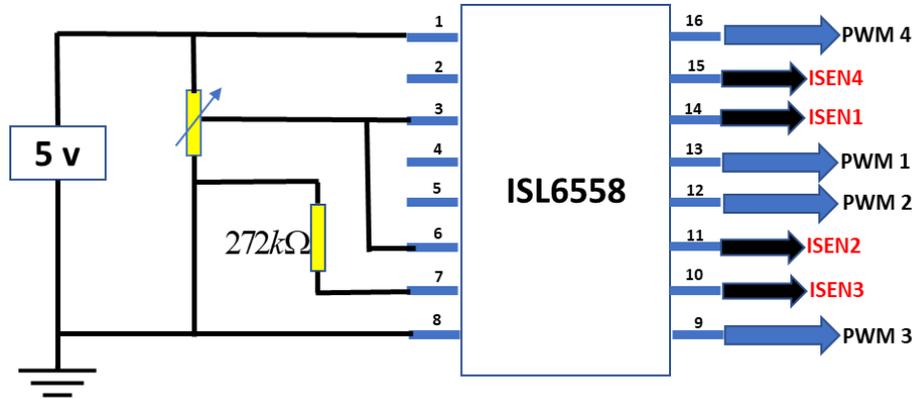


Figura 50. Conexión del circuito ISL6458.

En la Figura 51 se conectó un potenciómetro a la terminal 3 del circuito integrado se ajusta el valor del ciclo de trabajo, y una resistencia fija de  $272\text{ k}\Omega$  calculada para mantener fija una frecuencia de  $100\text{ kHz}$ . En la Figura 52 se presentan las señales PWM generadas por el circuito integrado.



Figura 51. Revisión de pulsos de conmutación del control ISL6558.

Una vez comprobada la funcionalidad del control ISL6558 se procede a observar la variación del ciclo de trabajo cuando se conecta el lazo de equalización y la salida de la señal en los drivers como se observa en la Figura 52.

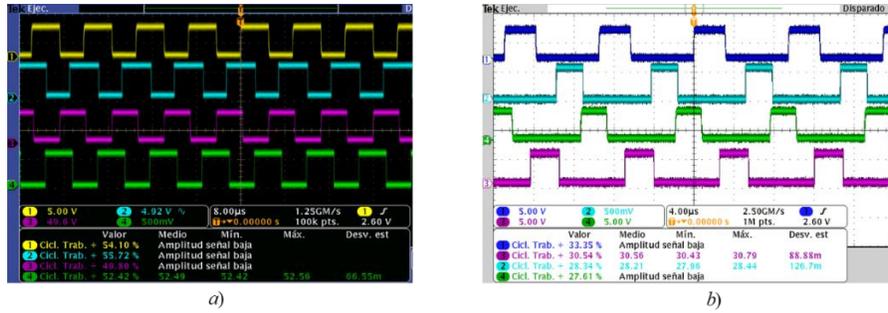


Figura 52. a) Variación del ciclo de trabajo individual ante perturbaciones de voltaje en los sensores de eualización.

### 5.3.2 Pruebas de funcionalidad del convertidor

El convertidor se probó con diferentes ciclos de trabajo para verificar su funcionamiento del convertidor en cada de las fases. El canal uno se observa el voltaje de salida, en al canal dos se observa la modulación PWM aplicado a la fase 1, el canal tres muestra la corriente que está circulando por la fase del convertidor y en el canal cuatro se muestra la corriente de salida del convertidor como se muestra en la Figura 53.

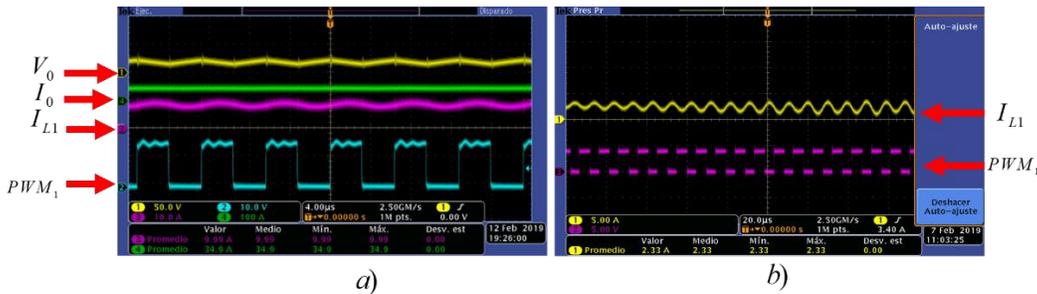


Figura 53. Funcionamiento del convertidor en diferentes condiciones.

Cabe mencionar que esta prueba solo realizo para observar el funcionamiento del convertidor en aspectos generales.

### 5.3.3 Pruebas de eualización de corrientes por fase

La eualización es un factor muy importante en esta topología esto debido a que si hay una mala distribución de corriente afecta directamente la eficiencia y estresa térmicamente más a los dispositivos discretos en alguna de las fases. En las Figuras 54 se muestra algunos casos de desequalización de corrientes en diferentes potencias analizadas.

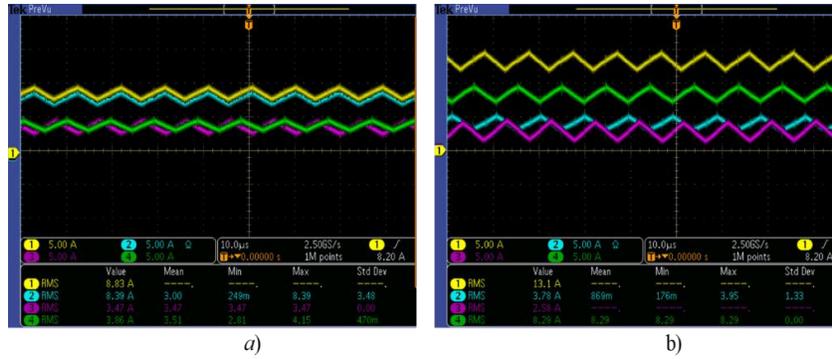


Figura 54. Corrientes desecualizadas

En la Tabla 24 se observa el desequilibrio de corrientes presentadas en la Figura 54, donde se puede observar que las fases 1 y fase 2 en el caso a), mientras que en el caso b) la fase 1 y fase 4 son las que cargan con la mayor cantidad de corriente. Esto puede ser causado por las diferentes resistencias parasitas presentes en cada fase, y las variaciones del ciclo de trabajo presentes en los diferentes tiempos de retrasos en los drives o diferentes capacitancias parasitas presentes en las compuertas de los transistores.

Tabla 24. Comparación de corrientes desecualizadas.

Fases	Caso a	Caso b
1	8.83	13.1
2	8.39	3.78
3	3.47	2.58
4	3.86	8.29

El control ISL6558 tiene la ventaja de tener un lazo de equalización de corrientes que tiene la facilidad de ser implementado. En la Figura 55 se observa algunos casos de equalización de corriente en diferentes condiciones de operación del SIREC. Las corrientes se equilibran o se mantienen cerca una de otra, sin embargo, no logro, mantener los valores igualitarios en corriente, debido a que existen variaciones entre ellas, pero menos significativas que el caso donde no se conecta el lazo de equalización. El principio de equalización es compensar las corrientes variando los PWM de manera individual hasta lograr equilibrar las corrientes que circulan por cada una de las fases.

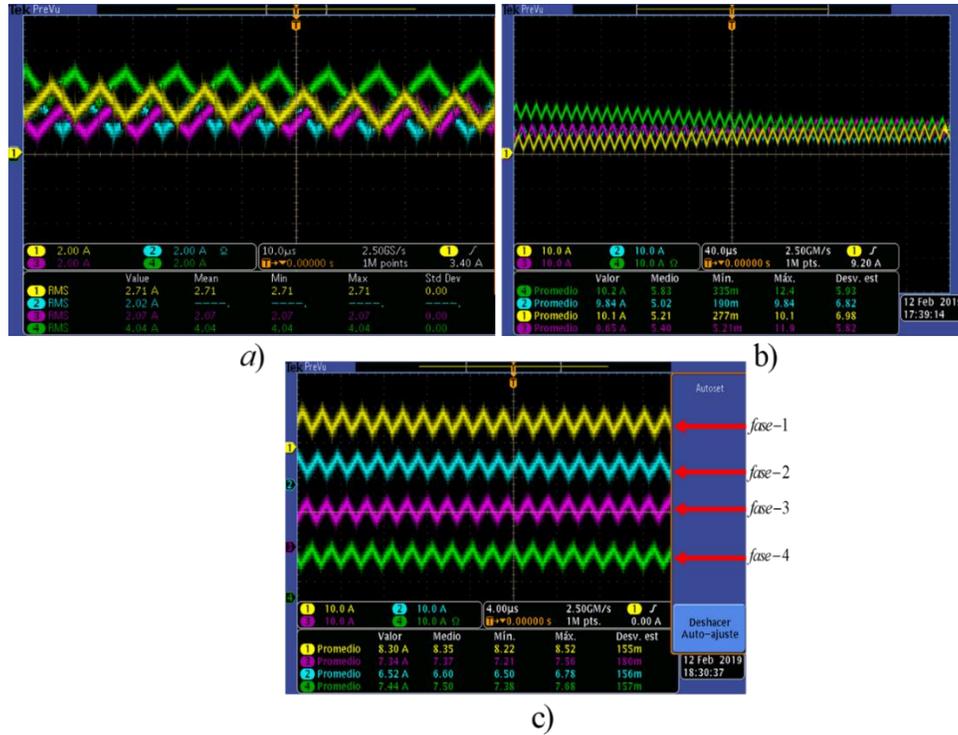


Figura 55. Corrientes en cada fase después de activar el lazo de ecualización.

En la Tabla 25 se observa el equilibrio de corrientes presentadas en la Figura 55, donde se puede observar que las fases 1 y fase 4 siguen cargando una mayor parte de corriente, aunque la diferencia es menos significativa que sin el lazo de ecualización.

Tabla 25. Comparación de corrientes ecualizadas.

Fases	Caso a	Caso b	Caso c
1	2.71	10.2	8.3
2	2.02	9.84	7.34
3	2.07	10.1	6.52
4	4.04	9.65	7.44

### 5.3.4 Pruebas típicas de eficiencia

Esta prueba consiste en medición de la eficiencia del convertidor en su potencia nominal, variando el ciclo de trabajo y variando la carga en la salida, en la Figura 56 se observa el comportamiento de la eficiencia del convertidor en la potencia nominal.

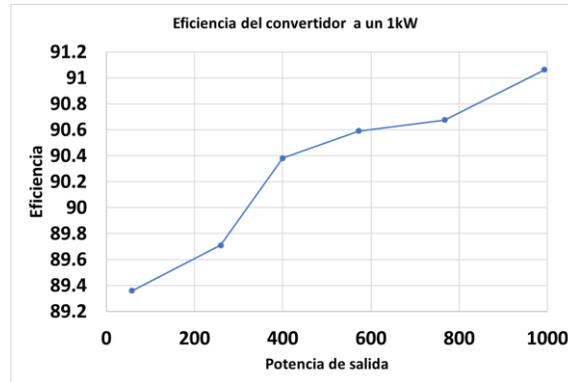


Figura 56. Análisis de eficiencia del convertidor a potencia nominal.

Estas pruebas sirven para concluir que el convertidor a potencia nominal de 1000 watts tiene una eficiencia promedio de 91.06%, con lo cual se comparó con la eficiencia de simulación donde se esperaba una eficiencia del 93%, sin embargo, no alcanzamos la eficiencia calculada teniendo un error de 1.94%.

### 5.3.5 Pruebas en diferentes condiciones de SIREC

El SIREC propone diferentes modos de operación esto se debe a las técnicas del carga de de baterías, corriente constante- voltaje constante recomendado para alargar su tiempo de vida útil. En la Figura 57 se observa el comportamiento del voltaje y corriente durante los diferentes modos de operación del SIREC.

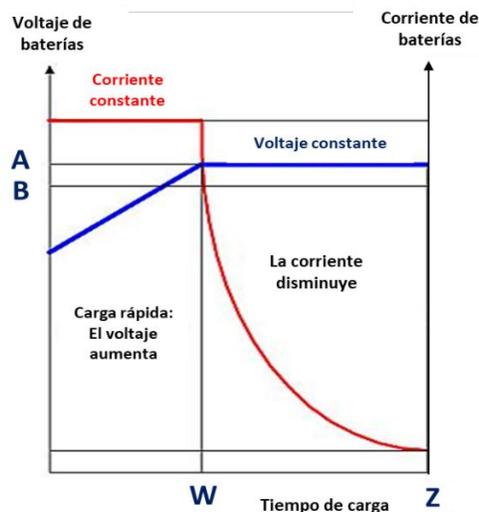


Figura 57. Técnica de corriente constante – voltaje constante para cargar baterías

El SIREC propone mantener un voltaje constante de 24 V y una corriente variable de 16 a 30 A, esto ocurriría en el rango de potencia de 400 a 700 Watts y propone una corriente constante de 40 A y un voltaje variable de 18 a 24 V en el rango de potencia de 750 a 1000 Watts.

En la Tabla 26 se observa las condiciones y resultados en las que se llevaron las pruebas en el laboratorio, considerando la máxima corriente que se le puede extraer al generador que es de 10 amperes y el voltaje generado en las diferentes velocidades a las que se somete el generador durante las pruebas.

Tabla 26. Condiciones de operación del SIREC a las que se sometió el convertidor.

Voltaje de entrada	Voltaje de salida	Corriente de entrada	Corriente de salida	Potencia de entrada	Ciclo de trabajo	Potencia de salida	Eficiencia
40	23.12	10	16.180	400	0.6	374.0816	93.52
50	24.51	10	19.050	500	0.48	466.9155	93.38
60	24.1	10	23.200	600	0.4	559.12	93.18
70	22.94	10	28.400	700	0.34	651.496	93.07
75	17.59	10	39.500	750	0.24	694.805	92.64
80	18.6	10	39.610	800	0.24	736.746	91.09
90	20.65	10	40.120	900	0.24	828.478	91.07
100	23.8	10	38.350	1000	0.24	912.73	91.06

### 5.3.6 Análisis de eficiencia en diferentes etapas de operación del SIREC

El SIREC presenta diferentes eficiencias durante el manejo de energía para el diferente modo de operación como se observa en la Figura 58. Donde se observa que la tendencia de la eficiencia del sistema es tiende a caer dependiendo el modo de operación en el que se encuentre operando.

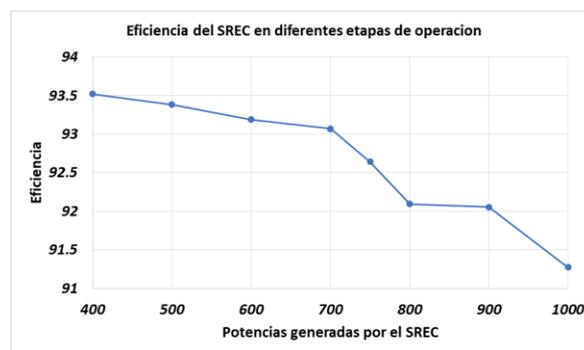


Figura 58 Eficiencia del SIREC en diferentes etapas de operación.

En la Tabla 27 se describen las eficiencias obtenidas en cada una de las etapas de potencia en las que opera el SIREC.

Tabla 27. Eficiencia del SIREC en cada etapa de operación.

Potencia de entrada	Eficiencia
<b>Modo voltaje constante</b>	
400	93.52
500	93.38
600	93.18
700	93.07
<b>Promedio</b>	<b>93.28</b>
<b>Modo corriente constate</b>	
750	91.64
800	91.09
900	91.05
1000	90.95
<b>Promedio</b>	<b>91.18</b>

En la Figura 59 se observa los diferentes modos de operación del SIREC y se realiza una conclusión analítica de las pruebas realizadas.

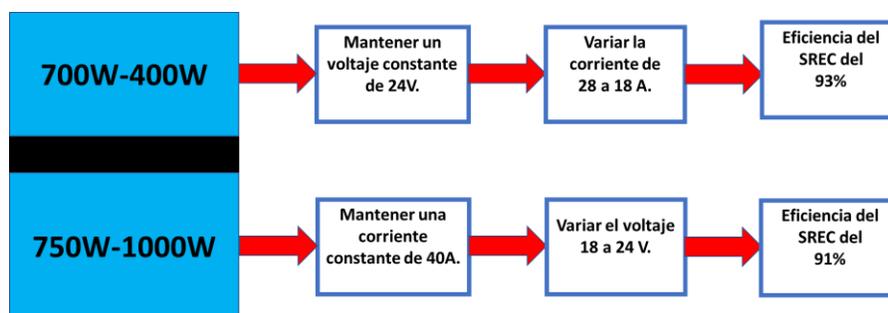


Figura 59. Esquema de operación del SIREC.

El SIREC requiere diferentes modos de operación para hacer una carga adecuada del banco de baterías, se puede observar que la eficiencia en modo de operación voltaje constante tiene una eficiencia aproximada del 93%, mientras que en su modo de operación corriente constante tiene una eficiencia aproximada del 91%.

### 5.3.7 Pruebas y análisis de temperatura en dispositivos discretos

En esta prueba se analizó las temperaturas de los dispositivos discretos en cada una de las fases, considerando la siguiente metodología.

1. Se inicia cada prueba a una temperatura ambiente de 24 °C.
2. Las pruebas tendrán una duración de 60 segundos.
3. Las pruebas se realizan considerando diferentes potencias a las que operara el convertidor, es decir, de 400 a 1000 W.
4. Estas pruebas se repetirán para dos casos diferentes casos de ecualización.

En la Figura 60 se observa el espectro de temperatura cuando el lazo de ecualización no se encuentra activo.

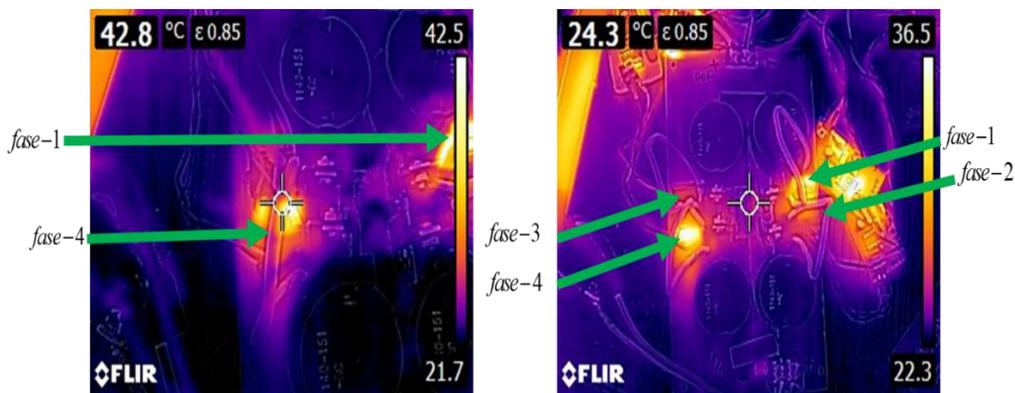


Figura 60. Espectro de temperatura en el convertidor sin ecualización de corrientes.

Se observa que la mayor radiación de calor sobre las fases 1 y 4 esto se debe a que son esas ramas donde se encuentra circulando la mayor cantidad de corriente en esos momentos. Mientras que la Figura 61 se observa la temperatura de cada uno de los MOSFET's cuando el lazo de ecualización se encuentra activo. Sin embargo, se observa que existen variaciones de temperatura durante su operación, pero estas diferencias son menores que cuando no está activo el lazo de ecualización.

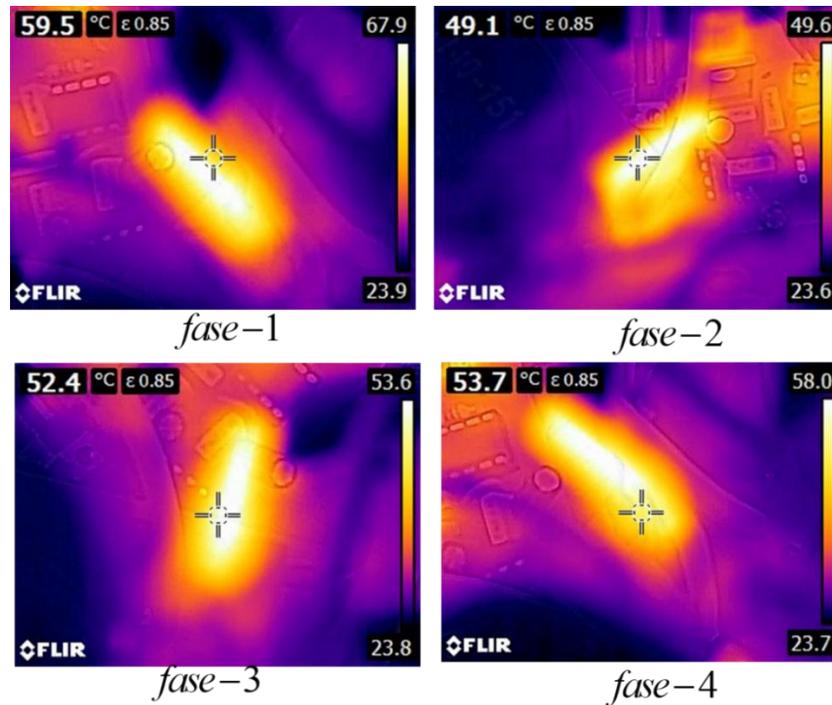


Figura 61. Espectros de temperatura con el lazo de ecualización.

En la Figura 62 y 63 se analiza el efecto de la ecualización sobre la temperatura de en los dispositivos MOSFET's, esta prueba se realiza para diferentes potencias de salida entre 400 y 1000W. Las temperaturas de los dispositivos discretos en cada una de las fases en diferentes potencias en cada uno de los casos, con corrientes ecualizadas y sin ecualizar.

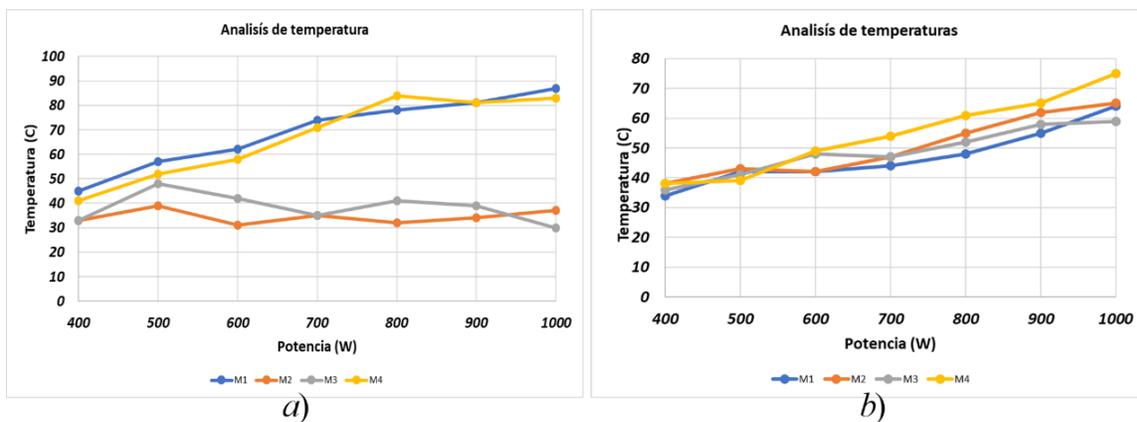


Figura 62. Tendencia de temperatura ante diferentes condiciones de ecualización en los MOSFET's a) corrientes desecualizadas y b) corrientes ecualizadas.

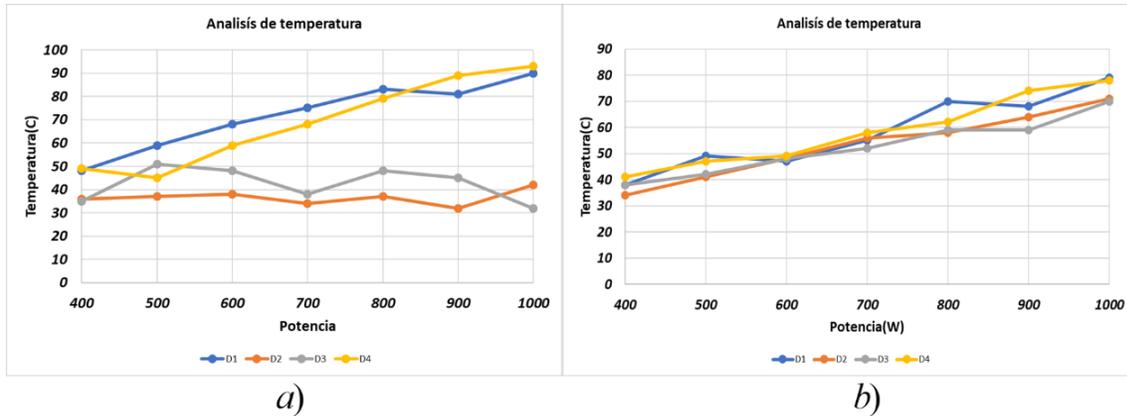


Figura 63. Tendencia de temperatura ante diferentes condiciones de ecualización en los Diodos a) corrientes desecualizadas y b) corrientes ecualizadas.

En base al análisis de temperatura se puede concluir que es importante la ecualización de corriente esto debido a que las temperaturas son un reflejo de la potencia disipada en cada uno de los dispositivos. Se debe de tomar en cuenta que la resistencia  $R_{DS(on)}$  cambia de valor cuando varía la temperatura del MOSFET, lo cual es una causa posible de desecualización de corrientes en las fases.

### 5.3.8 Discusión de resultados.

Los resultados obtenidos son causa los diferentes condiciones de ecualización, con estas condiciones de ecualización se incrementa el tiempo de vida útil de los dispositivos discretos, se alcanza una eficiencia superior al 90% , se equilibra el estrés térmico en los diodos y MOSFET's, se analiza el comportamiento del sistema ante sus diferentes estados de operación donde se observa que en la etapa de corriente constante la eficiencia cae dividido la mayor de cantidad corriente que circula en cada fase, mientras que en su etapa de modo voltaje la eficiencia es mayor porque la corriente que circula es mucho menor y por lo tanto el estrés térmico es proporcional.

---

## Capítulo 6

### Conclusiones y trabajos futuros

---

Este capítulo tiene como meta presentar las conclusiones a las que se llegó al término del proyecto de tesis. Se mencionan también, las dificultades presentados en el trascurso de la tesis, los logros obtenidos durante su realización y los trabajos futuros a desarrollar partiendo del proyecto.

### 6.1 Conclusiones

La eficiencia energética ha cobrado gran relevancia en las últimas fechas esto debido a los altos costos de los combustibles en México, y su tendencia a elevarse de manera abrupta. De ahí la relevancia que ha cobrado la electrónica de potencia proponiendo diversas soluciones. Este trabajo se propone un sistema de recuperación de energía cinética basado en un volante de inercia para el sector industrial automotriz, cuya problemática detectada fue la selección y el diseño la topología cd-cd que fuera la mejor opción para transferir la energía del volante de inercia a un banco de baterías, para lo cual se seleccionó un convertidor Multifase. Durante este trabajo se concluyeron los siguientes efectos del convertidor Buck cuatro fases:

La eficiencia del Buck cuatro fases es afectada por la desecualización de las corrientes en cada fase, es fenómeno se concluye en base a lo estudiado en la literatura, simulaciones y la implementación, corroborando que el factor que más le afecta es las variaciones de resistencias parasitas cambiantes en por el efecto de la temperatura, sumado a una mala estrategia del control en el ciclo de trabajo puede empeora este efecto. Una mala distribución de corriente perjudica todos los beneficios del convertir como es el caso de alta eficiencia, disminución de rizo a la salida, distribución de estrés térmico, entre otros. Cabe mencionar que el SIREC propuesto sería capaz de recuperar aproximadamente 10 kW-hora en un día, energía que puede ser empleada para alimentar actividades secundarias como iluminación o equipos de cómputo por mencionar algunos.

### 6.2 Otros logros

Cabe mencionar que, durante el desarrollo de este proyecto, se participó en diferentes eventos con el mismo proyecto o una derivación del tema de tesis obteniendo gratos resultados. A continuación, menciono los eventos y los logros obtenidos.

1. Se publicó y participó en el Congreso Internacional de Electrónica de Potencia, llevado a cabo el 18 de octubre de 2018 en Cholula, Puebla, con el artículo titulado “Analysis of kinetic energy recovery system based on inertial flywheel”. **Anexo 4.**
2. Se participó en el concurso interno tres minutos sobre mi tesis en el centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico, llevado a cabo el día 31 de mayo de 2018 obteniéndose el primer lugar.

3. Se participó en el Evento Nacional Estudiantil de Innovación Tecnología 2018 en su etapa local, llevada a cabo el día 15 de junio en las instalaciones del CENIDET, obteniéndose el segundo lugar, y logrando una valiosa participación en la etapa regional en Puebla.
4. Se realizó una estancia en el IPN-ESIME Culhuacán en el departamento de Electrónica-ICE bajo la supervisión del Dr. Leobardo Hernández González.

### **6.3 Dificultades en el trascurso del proyecto**

Algunas circunstancias de logística retrasaron la implementación del convertidor CD-CD, esto debido al retraso de materiales requeridos para la parte experimental. Otra dificultad en este proyecto fue la falta de conocimiento sobre el control ISL6558. Lo que ocasiono algunas dificultades en la implementación de la ecualización de corriente por fase.

### **6.4 Trabajos futuros**

Durante el desarrollo de las actividades de tesis se encontraron algunas limitaciones que pueden ser mejoradas mediante la realización de alguno de los siguientes trabajos futuros:

- Aunque en este trabajo se emularon las condiciones teóricas del SIREC por cuestiones de personales y de tiempo no se logró ensamblar todas las partes del que lo componen, es decir, probar con el emulador de los rodillos de aceleración y desaceleración, la transmisión unidireccional, el volante de inercia, generador de cd, convertidor multifase y el banco de baterías. Cabe aclarar que las experimentaciones se realizaron, en la medida de lo disponible, en las condiciones operativas, no obstante, sería interesante las pruebas en las condiciones reales.
- Es importante un algoritmo de control para determinados modos de operación del SIREC, es decir, en algunos momentos es importante como se maneja la energía para evitar frenar de manera inmediata el volante de inercia, además este algoritmo debe considerar los diferentes estados de carga de las baterías (corriente constante, voltaje constante y voltaje flotado).
- Se debe de diseñar un sistema de monitoreo del estado de carga del banco de baterías esto para evitar la desecualización al momento de cargar cada unidad, para evitar el daño por sobre corrientes o sobre voltaje, y así lograr incrementar la vida útil de las mismas.

**Referencias**

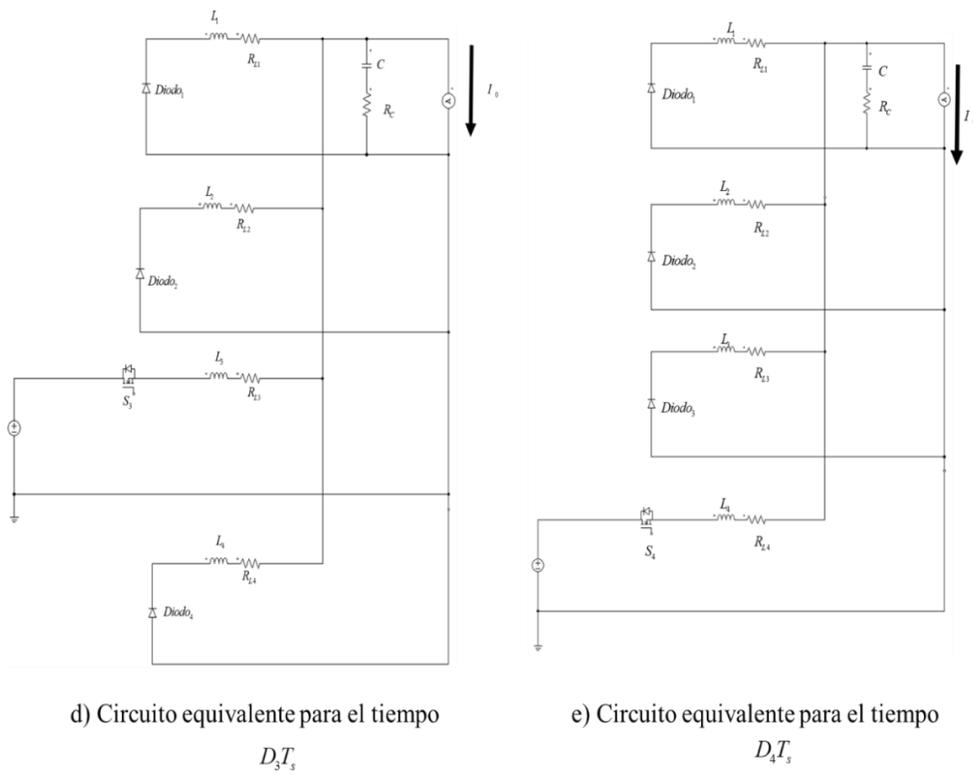
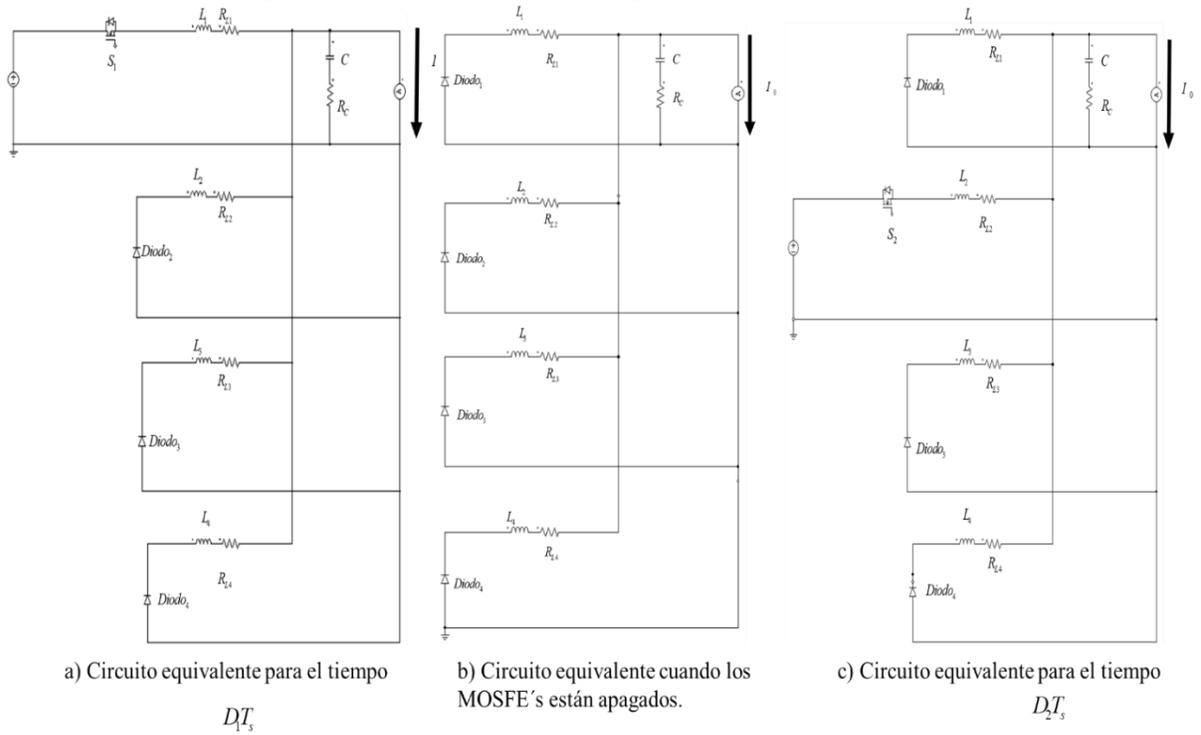
- [1] Secretaria de Energía, Balance Energético 2018, eficiencia energética en el sector industrial, Octubre,2018, pag. 44.
- [2] Secretaria de Energía, Proceso de identificación de oportunidad de ahorro de energía, eficiencia energética en procesos industriales, Octubre 2018, pag.15.
- [3] Z. Hadas, V. Singule, S. Vechet and C. Ondrusek, “Development of energy harvesting sources for remote applications as mechatronic systems”, in Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International, 2010, pp. 10-13.
- [4] J. M. Carrasco, “Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 53, No. 4, pp. 1002-1016, 2006.
- [5] J. H. Paulides, J. W. Jansen, L. Encica, E. A. Lomonova and M. Smit, “Human-powered small-scale generation system for a sustainable dance club”, in Electric Machines and Drives Conference, 2009, IEMDC’09. IEEE International, pp. 439-444.
- [6] L. Mateu, C. Codrea, N. Lucas, M. Pollak and P. Spies, “Human body energy harvesting thermogenerator for sensing applications”, in Sensor Technologies and Applications, 2007, SensorComm 2007, International Conference on, pp. 366-372.
- [7] X. Zhang, S. Hu and H. Tzou, “Electromechanical coupling and energy harvesting of circular rings”, in Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2011 Symposium on, 2011, pp. 514-517.
- [8] Secretaria de Energía, Indicadores de eficiencia energetica en Mexico 2015, eficiencia energética en el sector industrial, 2015, pag. 44.
- [9] T. S. Villodres, "Análisis sobre la implementación del sistema de recuperación de energía KERS en un vehículo convencional mediante simulación," Departamento de ingeniería, Escuela técnica Superior de Ingeniería Industrial, ICAI. Madrid, España., 2015.
- [10] Jenn y Broutin and Carmen Trudell, “Fluxxlab Revolution Door is Eco-Friendly, People-Powered Power Station”, Magazine Clean Energy and Technology, 2009, pp. 61-72.
- [11] M. S. Murthy, Y. S. Patil, S. V. K. Sharma, B. Poley, S. S. Kolte and N. Doji, “Revolving doors producing green energy”, Clean Energy and Technology (CET), 2011 IEEE First Conference on, 2011, pp. 157-160
- [12] J. J. H. Paulides, J. W. Jansen, L. Encica, E. A. Lomonova and M. Smit, “The Sustainable Energy Floor is a human-powered interactive floor system that converts kinetic energy from walking or dancing into electricity”, in Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC’09. IEEE International, 2009, pp. 439-444.

- [13] J. W. Jansen, J. J. H. Paulides, J. W. Jansen, L. Encica, E. A. Lomonova and M. Smit, "Power From the People", in Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'09. IEEE International, 2011, pp. 439-444.
- [14] J. Feenstra, J. Granstrom and H. Sodano, "Energyharvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 22, No. 3, 2008, pp. 721-734.
- [15] G. Wang, C. Luo, H. Hofmann and L. Rome, "Power electronic circuitry for energy harvesting backpack", in EnergyConversion Congress and Exposition, IEEE, 2009, pp. 3544-3549.
- [16] B. Hayes and L. Goguely, "Bicycle Power Generator Design for DC House: Off Grid Energy Solutions", Sr. Proj. Calif. Polytech. State Univ. San Luis Obispo, Calif., 2011.
- [17] H. Oman, W. C. Morchin and F. E. Jamerson, "Electric-bicycle propulsion power", in WESCON/'95. Conference record. 'Microelectronics Communications Technology Producing Quality Products Mobile and Portable Power Emerging Technologies', 1995, p. 555-561.
- [18] Meng-Yuan Tsai, Tsorng-Juu Liang and Yu-Meng Lin, "Loss analysis and optimized design of DC-DC converter for battery module," *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, Kaohsiung, 2017, pp. 692-697.
- [19] H. Babazadeh, W. Gao, and X. Wang, "Controller Design for a Hybrid Energy Storage System Enabling Longer Battery Life in Wind Turbine Generators," in North American Power Symposium (NAPS), 2011, 2011, pp. 1-7.
- [20] B. G. Beaman and G. M. Rao, "Hybrid Battery and Flywheel Energy Storage System for LEOSpacecraft," in Battery Conference on Applications and Advances, 2015., The Thirteenth Annual, 2015, pp. 113-116.
- [21] L. Ripoll, Análisis y diseño de volantes de inercia de materiales compuestos, Departamento de Mecanica, universidad de Madrid, Madrid, España 2005, pp 17-30
- [22] I. Stoppa, J. Lundin, N. Lima and J. G. Oliveira, "Dual voltage/power system by battery/flywheel configuration," *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Fortaleza, 2015, pp. 1-6.
- [23] M. Hruska and M. Jara, "High Efficiency and High Power Density Boost / Buck Converter with SiC JFET Modules for Advanced Auxiliary Power Supplies in Trolleybuses," *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg, Germany, 2016, pp. 1-6.

- [24] V. M. Pacheco, A. J. do Nascimento, V. J. Farias, J. Batista Vieira and L. C. de Freitas, "A quadratic buck converter with lossless commutation," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 2, pp. 264-272, 2008.
- [25] A. Mirzaei, A. Jusoh, Z. Salam, E. Adib and H. Farzanehfard, "A novel soft switching bidirectional coupled inductor Buck-Boost converter for battery discharging-charging," *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, Johor Bahru, 2011, pp. 195-199.
- [26] U. Boeke, "High Efficiency Flyback Converter Technology," *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, Nagoya, 2007, pp. 1268-1273.
- [27] P. Zumel, C. Fernández, A. de Castro and O. García, "Efficiency improvement in multiphase converter by changing dynamically the number of phases," *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, 2006, pp. 1-6.
- [28] Peng Xu, Jia Wei and F. C. Lee, "Multiphase coupled-buck converter-a novel high efficient 12 V voltage regulator module," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 74-82, Jan. 2003.
- [29] Abraham Claudio Sánchez, Diseño e Implementación de un Sistema de Recuperación de Energía (Diseño e implementación de prototipo), Reporte Final Cenidet-Nissan, octubre 2013.
- [30] IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery - Redline," in *IEEE Std 43-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000) - Redline*, vol., no., pp.1-75, 6 March 2014
- [31] K. Wei, X. Dai and P. Liu, "Model and balance of flywheel energy storage system with composite flywheel and rolling bearings," *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, 2017, pp. 1-6.
- [32] J. Li *et al.*, "Influence of load on discharge performance of high-speed flywheel energy storage system," *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, 2017, pp. 1-5.
- [33] Xianyi Qian, "Application research of flywheel battery in the wind and solar complementary power generation," *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICASM 2010)*, Taiyuan, 2010, pp. V13-546-V13-550
- [34] D. W. Swett and J. G. Blanche, "Flywheel charging module for energy storage used in electromagnetic aircraft launch system," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 525-528, Jan. 2005.

- [35] Jianguo Wang, Jianhui Su, Jidong Lai, Jian Zhang and Shuya Wang, "Research on control method for flywheel battery energy storage system," *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, Hefei, 2016, pp. 1006-1010.
- [36] N. Higuera Juarez, A. C. Sanchez and L. G. Vela Valdes, "Energy Performance Analysis In An Electrical Subway Traction System," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 729-736, Feb. 2016
- [37] W. Chen, "High Efficiency, High Density, PolyPhase Converters for High Current Applications," ed. LINEAR Technology 1999.
- [38] J. C. Vilchis, "Análisis de estructuras multifase para mejorar la eficiencia en convertidores buck síncronos para la tecnología LPIA-INTEL," Departamento de Electronica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET. Cuernavaca, Morelos, México., 2009.
- [39] J. C. Vilches "Análisis de estructuras multifase para mejorar la eficiencia en convertidores buck síncronos para la tecnología LPIA-INTEL," Departamento de Electronica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET. Cuernavaca, Morelos, México., 2009.
- [40] J. C. Martínez, "Algoritmos para optimizar la eficiencia en un sistema de alimentación basado en convertidores buck síncrono operando en modo de conducción discontinuo ", Departamento de Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET. Cuernavaca, Morelos, México., 2014.
- [41] J. M. Jiménez, "Revisión de técnicas de control para el balance de corriente en un sistema de alimentación multifase basado en el convertidor buck," departamento de Electrónica Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET. Cuernavaca, Morelos, México., 2012.
- [42] J. Gordillo and C. Aguilar, "A Simple Sensorless Current Sharing Technique for Multiphase DC-DC Buck Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 3480-3489.
- [43] I. Reyes, A. Claudio, E. Flores and M. Lopez, "Analysis of kinetic energy recovery system based on inertial flywheel," *2018 14th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Cholula, 2018, pp. 130-136.

Anexo 1. Metodologías de variable de estados promediados



Circuitos equivalentes para el convertidor Buck cuatro fases.

Ecuaciones del estado a)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\left(\frac{R_1 + R_C}{L_1}\right)x_1 - \frac{R_C}{L_1}x_2 - \frac{R_C}{L_1}x_3 - \frac{R_C}{L_1}x_4 - \frac{1}{L_1}x_5 + \frac{1}{L_1}V_{IN} + \frac{R_C}{L_1}I_o \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R_C}{L_2}x_1 - \left(\frac{R_2 + R_C}{L_2}\right)x_2 - \frac{R_C}{L_2}x_3 - \frac{R_C}{L_2}x_4 - \frac{1}{L_2}x_5 + \frac{R_C}{L_2}I_o \\ \dot{x}_3 &= -\frac{R_C}{L_3}x_1 - \frac{R_C}{L_3}x_2 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_3}\right)x_3 - \frac{R_C}{L_3}x_4 - \frac{1}{L_3}x_5 + \frac{R_C}{L_3}I_o \\ \dot{x}_4 &= -\frac{R_C}{L_4}x_1 - \frac{R_C}{L_4}x_2 - \frac{R_C}{L_4}x_3 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_4}\right)x_4 - \frac{1}{L_4}x_5 + \frac{R_C}{L_4}I_o \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{C}x_2 + \frac{1}{C}x_3 + \frac{1}{C}x_4 - \frac{1}{C}I_o \end{aligned}$$

Ecuaciones del estado b)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\left(\frac{R_1 + R_C}{L_1}\right)x_1 - \frac{R_C}{L_1}x_2 - \frac{R_C}{L_1}x_3 - \frac{R_C}{L_1}x_4 - \frac{1}{L_1}x_5 + \frac{R_C}{L_1}I_o \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R_C}{L_2}x_1 - \left(\frac{R_2 + R_C}{L_2}\right)x_2 - \frac{R_C}{L_2}x_3 - \frac{R_C}{L_2}x_4 - \frac{1}{L_2}x_5 + \frac{R_C}{L_2}I_o \\ \dot{x}_3 &= -\frac{R_C}{L_3}x_1 - \frac{R_C}{L_3}x_2 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_3}\right)x_3 - \frac{R_C}{L_3}x_4 - \frac{1}{L_3}x_5 + \frac{R_C}{L_3}I_o \\ \dot{x}_4 &= -\frac{R_C}{L_4}x_1 - \frac{R_C}{L_4}x_2 - \frac{R_C}{L_4}x_3 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_4}\right)x_4 - \frac{1}{L_4}x_5 + \frac{R_C}{L_4}I_o \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{C}x_2 + \frac{1}{C}x_3 + \frac{1}{C}x_4 - \frac{1}{C}I_o \end{aligned}$$

Ecuaciones del estado c)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\left(\frac{R_1 + R_C}{L_1}\right)x_1 - \frac{R_C}{L_1}x_2 - \frac{R_C}{L_1}x_3 - \frac{R_C}{L_1}x_4 - \frac{1}{L_1}x_5 + \frac{R_C}{L_1}I_o \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R_C}{L_2}x_1 - \left(\frac{R_2 + R_C}{L_2}\right)x_2 - \frac{R_C}{L_2}x_3 - \frac{R_C}{L_2}x_4 - \frac{1}{L_2}x_5 + \frac{1}{L_2}V_{IN} + \frac{R_C}{L_2}I_o \\ \dot{x}_3 &= -\frac{R_C}{L_3}x_1 - \frac{R_C}{L_3}x_2 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_3}\right)x_3 - \frac{R_C}{L_3}x_4 - \frac{1}{L_3}x_5 + \frac{R_C}{L_3}I_o \\ \dot{x}_4 &= -\frac{R_C}{L_4}x_1 - \frac{R_C}{L_4}x_2 - \frac{R_C}{L_4}x_3 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_4}\right)x_4 - \frac{1}{L_4}x_5 + \frac{R_C}{L_4}I_o \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{C}x_2 + \frac{1}{C}x_3 + \frac{1}{C}x_4 - \frac{1}{C}I_o \end{aligned}$$

Ecuaciones del estado d)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\left(\frac{R_1 + R_C}{L_1}\right)x_1 - \frac{R_C}{L_1}x_2 - \frac{R_C}{L_1}x_3 - \frac{R_C}{L_1}x_4 - \frac{1}{L_1}x_5 + \frac{R_C}{L_1}I_o \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R_C}{L_2}x_1 - \left(\frac{R_2 + R_C}{L_2}\right)x_2 - \frac{R_C}{L_2}x_3 - \frac{R_C}{L_2}x_4 - \frac{1}{L_2}x_5 + \frac{R_C}{L_2}I_o \\ \dot{x}_3 &= -\frac{R_C}{L_3}x_1 - \frac{R_C}{L_3}x_2 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_3}\right)x_3 - \frac{R_C}{L_3}x_4 - \frac{1}{L_3}x_5 + \frac{1}{L_3}V_{IN} + \frac{R_C}{L_3}I_o \\ \dot{x}_4 &= -\frac{R_C}{L_4}x_1 - \frac{R_C}{L_4}x_2 - \frac{R_C}{L_4}x_3 - \left(\frac{R_4 + R_C}{L_4}\right)x_4 - \frac{1}{L_4}x_5 + \frac{R_C}{L_4}I_o \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{C}x_2 + \frac{1}{C}x_3 + \frac{1}{C}x_4 - \frac{1}{C}I_o \end{aligned}$$

Ecuaciones del estado e)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\left(\frac{R_1 + R_C}{L_1}\right)x_1 - \frac{R_C}{L_1}x_2 - \frac{R_C}{L_1}x_3 - \frac{R_C}{L_1}x_4 - \frac{1}{L_1}x_5 + \frac{R_C}{L_1}I_o \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R_C}{L_2}x_1 - \left(\frac{R_2 + R_C}{L_2}\right)x_2 - \frac{R_C}{L_2}x_3 - \frac{R_C}{L_2}x_4 - \frac{1}{L_2}x_5 + \frac{R_C}{L_2}I_o \\ \dot{x}_3 &= -\frac{R_C}{L_3}x_1 - \frac{R_C}{L_3}x_2 - \left(\frac{R_3 + R_C}{L_3}\right)x_3 - \frac{R_C}{L_3}x_4 - \frac{1}{L_3}x_5 + \frac{R_C}{L_3}I_o \\ \dot{x}_4 &= -\frac{R_C}{L_4}x_1 - \frac{R_C}{L_4}x_2 - \frac{R_C}{L_4}x_3 - \left(\frac{R_4 + R_C}{L_4}\right)x_4 - \frac{1}{L_4}x_5 + \frac{1}{L_4}V_{IN} + \frac{R_C}{L_4}I_o \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{C}x_2 + \frac{1}{C}x_3 + \frac{1}{C}x_4 - \frac{1}{C}I_o \end{aligned}$$

- Una vez obtienen las matrices a A1, A2, A3, A4, A5 y B1, B2, B3, B4, B5 a partir de las ecuaciones de cada estado de operación descrita en el tema 4.2

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_1 + R_C}{L_1}\right) & -\frac{R_C}{L_1} & -\frac{R_C}{L_1} & -\frac{R_C}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ -\frac{R_C}{L_2} & -\left(\frac{R_2 + R_C}{L_2}\right) & -\frac{R_C}{L_2} & -\frac{R_C}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ -\frac{R_C}{L_3} & -\frac{R_C}{L_3} & -\left(\frac{R_3 + R_C}{L_3}\right) & -\frac{R_C}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ -\frac{R_C}{L_4} & -\frac{R_C}{L_4} & -\frac{R_C}{L_4} & -\left(\frac{R_4 + R_C}{L_4}\right) & -\frac{1}{L_4} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & \frac{R_C}{L_1} \\ 0 & \frac{R_C}{L_2} \\ 0 & \frac{R_C}{L_3} \\ 0 & \frac{R_C}{L_4} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} ; \dots B_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R_C}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} & \frac{R_C}{L_2} \\ 0 & \frac{R_C}{L_3} \\ 0 & \frac{R_C}{L_4} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} ; \dots B_3 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R_C}{L_1} \\ 0 & \frac{R_C}{L_2} \\ \frac{1}{L_3} & \frac{R_C}{L_3} \\ 0 & \frac{R_C}{L_4} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} ; \dots B_4 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R_C}{L_1} \\ 0 & \frac{R_C}{L_2} \\ 0 & \frac{R_C}{L_3} \\ \frac{1}{L_4} & \frac{R_C}{L_4} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} ; \dots B_5 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R_C}{L_1} \\ 0 & \frac{R_C}{L_2} \\ 0 & \frac{R_C}{L_3} \\ 0 & \frac{R_C}{L_4} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

2. Se procede a promediar las matrices

$$A = A_1 D_1 + A_2 (1 - D_1 - D_2 - D_3 - D_4) + A_3 D_2 + A_4 D_3 + A_5 D_4$$

$$B = B_1 D_1 + B_2 (1 - D_1 - D_2 - D_3 - D_4) + B_3 D_2 + B_4 D_3 + B_5 D_4$$

COMO SON IGUALES  $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A_5$

$$A = A_1 D_1 + A_2 (1 - D_1 - D_2 - D_3 - D_4) + A_3 D_2 + A_4 D_3 + A_5 D_4$$

$$A = A_1 D_1 + A_1 (1 - D_1 - D_2 - D_3 - D_4) + A_1 D_2 + A_1 D_3 + A_1 D_4$$

$$A = A_1 (1 - D_1 - D_2 - D_3 - D_4 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4)$$

$$A = A_1 (1)$$

$$A = A_1$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_1 + R_C}{L_1}\right) & -\frac{R_C}{L_1} & -\frac{R_C}{L_1} & -\frac{R_C}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ -\frac{R_C}{L_2} & -\left(\frac{R_2 + R_C}{L_2}\right) & -\frac{R_C}{L_2} & -\frac{R_C}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ -\frac{R_C}{L_3} & -\frac{R_C}{L_3} & -\left(\frac{R_3 + R_C}{L_3}\right) & -\frac{R_C}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ -\frac{R_C}{L_4} & -\frac{R_C}{L_4} & -\frac{R_C}{L_4} & -\left(\frac{R_4 + R_C}{L_4}\right) & -\frac{1}{L_4} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{D_1}{L_1} & \frac{R_C}{L_1} \\ \frac{D_2}{L_2} & \frac{R_C}{L_2} \\ \frac{D_3}{L_3} & \frac{R_C}{L_3} \\ \frac{D_4}{L_4} & \frac{R_C}{L_4} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

3. Se procede a resolver la siguiente operación matricial

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_o \end{bmatrix} = -A^{-1}BU$$

$$U = [V_m \quad I_o]^T$$

4. Resultados

$$I_1 = \frac{V_m [R_3 R_4 (D_1 - D_2) + R_2 R_4 (D_1 - D_3) + R_2 R_3 (D_1 - D_4)] + I_o (R_2 R_3 R_4)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4}$$

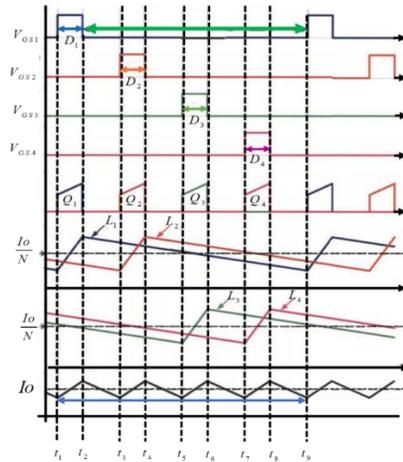
$$I_2 = \frac{V_m [R_3 R_4 (D_2 - D_1) + R_1 R_4 (D_2 - D_3) + R_1 R_3 (D_2 - D_4)] + I_o (R_1 R_3 R_4)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4}$$

$$I_3 = \frac{V_m [R_2 R_4 (D_3 - D_1) + R_1 R_4 (D_3 - D_2) + R_1 R_2 (D_3 - D_4)] + I_o (R_1 R_2 R_4)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4}$$

$$I_4 = \frac{V_m [R_2 R_3 (D_4 - D_1) + R_1 R_3 (D_4 - D_2) + R_1 R_2 (D_4 - D_3)] + I_o (R_1 R_2 R_3)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4}$$

$$V_o = \frac{V_m [D_1 R_2 R_3 R_4 + D_2 R_1 R_3 R_4 + D_3 R_1 R_2 R_4 + D_4 R_1 R_2 R_3] + I_o (R_1 R_2 R_3 R_4)}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4}$$

**Anexo 2. Cálculos de parámetros de diseño del convertidor Buck multifase.**



**Definiciones del Buck multifase**

El producto de N fases por la corriente de cada fase da como resultado la corriente de salida

$$I_o = N * I_{f\acute{a}se}$$

El producto de N fases por la conmutación de los MOSFET´s da como resultado frecuencia en la entrada del capacitor.

$$f_{cap} = N * fs$$

**Cálculo del tamaño del inductor**

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$L = V_L \frac{dt}{di} \quad \text{Donde } di = (\Delta I_{f\acute{a}se}) \text{ el rizo de corriente a la salida del inductor}$$

$$V_L = V_o$$

$dt = (1-D)T_s$  Donde  $T_s$  es el periodo de conmutación Y D es el ciclo de trabajo.

Aplicando la inversa  $T_s = \frac{1}{fs}$  de la obtenemos  $L = \frac{(1-D)V_o}{\Delta I_{f\acute{a}se} fs}$

**Cálculo del tamaño del capacitor**

$$I_c = C \frac{dv}{dt}$$

$$C = I_c \frac{dt}{dv}$$

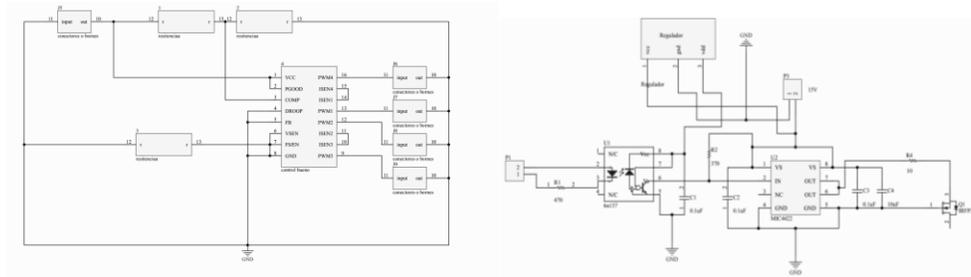
$$\int dv = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} I_c dt$$

Donde  $v_c = \frac{1}{C} [\Delta I_c]$

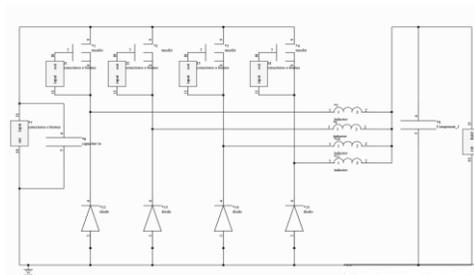
$$v_c = v_o = \frac{1}{C} * \frac{1}{2} * \frac{1}{4L} T_s^2 * \frac{1}{4}$$

donde  $C = \frac{v_o(1-D)}{32L\Delta_{vo}fs^2} = \frac{v_o(1-D)}{8L\Delta_{vo}fs_{cap}^2}$

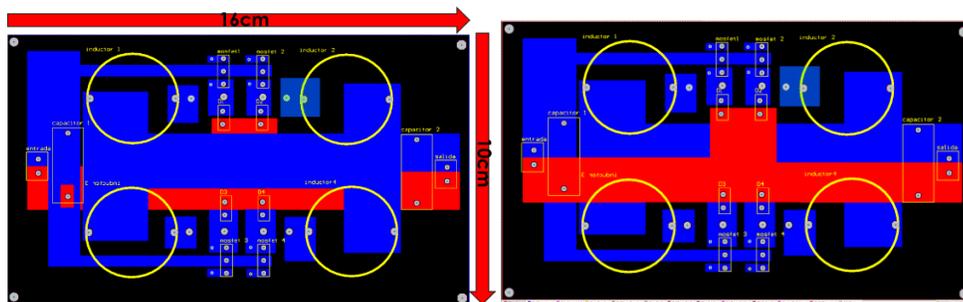
Anexo 3. Diseño de PCB's



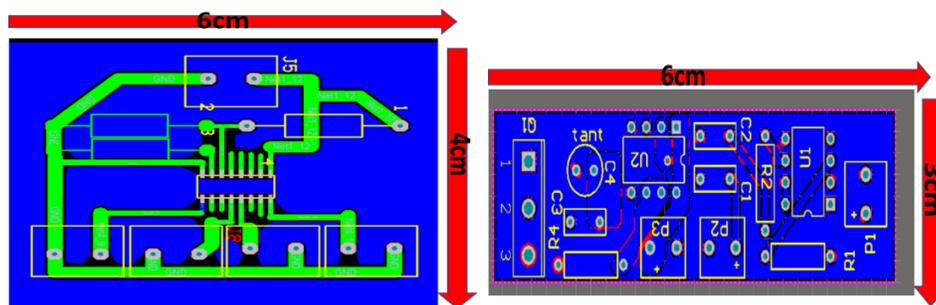
Esquemático del control y el impulsor en Altium Designer



Esquemático de la etapa de potencia en Altium Designer



Diseño de la etapa de potencia doble cara PCB



Diseño del impulsor y control

Anexo 4. Participación en el CIEP 2018

**UDLAP**®

**Universidad de las Américas Puebla**

by the Department of Computing, Electronics & Mechatronics,  
certifies the participation of

**Ivan Alfonso Reyes Portillo**

for presenting the paper entitled  
**Analysis of kinetic energy recovery  
system based on inertial flywheel**  
at the 14<sup>th</sup> International Conference on  
Power Electronics, CIEP 2018



**Gerardo Ayala San Martín, Ph.D.**  
Director of the Department of Computing,  
Electronics and Mechatronics



**Pedro Bañuelos Sánchez, Ph.D.**  
General Co-Chair CIEP 2018

October 24<sup>th</sup>, 2018, Puebla, Mexico.