

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Evaluación de celda SINAMICS en sistemas de almacenamiento y transmisión de energía

Rubén Antonio Cisterna Lagos

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Guía:

Dr. Ricardo A. Lizana F.

Comisión Evaluadora:

Dr. Abraham Márquez Alcaide.

Dr. Eduardo E. Espinosa N.

Concepción, Agosto de 2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Guía:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Evaluación de celda SINAMICS en sistemas de almacenamiento y transmisión de energía

Rubén Antonio Cisterna Lagos

Informe de Habilitación Profesional
para optar al título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto, 2024.

Resumen

En los últimos años, a raíz del notable progreso en tecnología y el desarrollo de la electrónica de potencia, la transmisión en corriente continua de alto voltaje (HVDC) ha despertado un considerable interés en el sector industrial. Este interés se fundamenta en los numerosos beneficios que ofrece en comparación con la transmisión en corriente alterna de alto voltaje (HVAC), tales como una disminución significativa de las pérdidas en las líneas de transmisión, prescindencia de compensación de reactivos, ausencia de limitaciones en la distancia de transmisión debidas a problemas de estabilidad, así como costos de transmisión (aérea) para distancias superiores a 600-1000 kilómetros, una capacidad de transporte entre 2 y 5 veces la de una línea de AC de tensión similar.

Para llevar a cabo la transmisión en HVDC, es esencial contar con un convertidor adecuado que posibilite la conversión AC/DC y DC/AC. En este contexto, la compañía Siemens comercializa el HVDC Plus, cuya tecnología se fundamenta en la topología de un convertidor modular multinivel (M^2C). Esta tecnología ofrece una arquitectura modular, una buena escalabilidad, así como una alta calidad en las formas de onda de salida, entre otras características destacadas, no obstante, cabe señalar que el M^2C presenta una desventaja asociada a la modulación, operación y gestión de activos. Debido a esto ha surgido un creciente interés en el ámbito académico por desarrollar nuevas topologías que permitan mejorar continuamente la operación, haciendo hincapié en la simplicidad del convertidor.

En este proyecto de habilitación profesional se expone la topología propuesta por Siemens de la celda SINAMICS mediante simulación en Matlab-Simulink para una primera etapa y de forma experimental mediante la elaboración de un setup en baja potencia para validar los resultados obtenidos de simulación, basándose en la configuración de un M^2C monofásico en la cual se conecta una celda en una rama superior (rama positiva) y otra en la rama inferior (rama negativa) constituyendo así una fase del convertidor, utilizando como base la tecnología SINAMICS. En este contexto se espera obtener voltajes de rama positiva y negativa de 3 niveles y un voltaje de carga de 2 niveles, se logran diversos beneficios, destacando una operación estable, robusta, haciendo uso de un esquema de balance de condensadores en el cual se fija que para un voltaje de alimentación de 100 [V] la desviación de los condensadores debe ser menor al 5% para lograr la estabilidad del sistema.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia, en especial a mi querida madre Luisa Lagos Cisterna, por su incondicional apoyo y amor a lo largo de toda mi vida.

También quiero agradecer a mis amigos, quienes me han apoyado y ayudado en los momentos difíciles durante el desarrollo de la carrera, por tener el privilegio de contar con su compañía, confianza y momentos muy gratos.

Finalmente, quiero agradecer al cuerpo docente de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la Universidad Católica de la Santísima Concepción que me han brindado las herramientas y conocimientos necesarios para mi desarrollo profesional. Especial mención para mi profesor Ricardo Lizana Fuentes, quien confió en mí y aceptó recibirme como alumno en su grupo de trabajo, gracias a su rigurosa enseñanza y a su comprensión pude llegar a puerto con este proyecto.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XI
ABREVIACIONES	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS	2
1.3. Revisión bibliográfica.....	2
1.3.1 Discusión	10
1.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO	11
1.5. OBJETIVOS	11
1.5.1 Objetivo General	11
1.5.2 Objetivos Específicos.....	11
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	12
1.7. TEMARIO Y METODOLOGÍA	12
CAPÍTULO 2. TOPOLOGÍA DE LA CELDA SINAMICS	14
2.1. INTRODUCCIÓN	14
2.2. TOPOLOGÍAS DE SUBMÓDULOS PARA <i>M2C</i>	14
2.3. CELDA SINAMICS.....	16
2.4. ANÁLISIS DE EFECTO SEGÚN LA DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE.	18
2.4.1 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = 0[V]$	18
2.4.2 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = VC1 [V]$	19
2.4.3 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = VC2 [V]$	20
2.4.4 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = VC1 + VC2 [V]$	21
2.5. DISCUSIÓN	22
CAPÍTULO 3. TOPOLOGÍA DEL <i>M2C</i> MONOFÁSICO.....	23
3.1. INTRODUCCIÓN	23
3.2. ESQUEMA DE BALANCE DE LOS CONDENSADORES DEL <i>M2C</i> MONOFÁSICO CON CELDA SINAMICS	23
3.2.1 Modulación	25
3.2.2 Generación de señales nivel PWM	26
3.2.3 Generación de algoritmo de balance de los condensadores del <i>M2C</i> monofásico	28
3.3. SIMULACIÓN DEL <i>M2C</i> MONOFÁSICO BASADO EN LA CELDA SINAMICS	29
3.3.1 Resultados de la simulación del <i>M2C</i> monofásico	29
3.4. DISCUSIÓN	35
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	36
4.1. INTRODUCCIÓN	36
4.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS	36
4.3. SIMULACIÓN EXPERIMENTAL DEL <i>M2C</i> MONOFÁSICO.....	40
4.3.1 Generación de algoritmo de balance de los condensadores etapa experimental	40
4.3.2 Cálculo de corriente de carga	47
4.3.3 Setup del <i>M2C</i> monofásico realizado en LEPA 1	48
4.3.4 Resultados del <i>M2C</i> monofásico experimental.....	49
4.4. DISCUSIÓN	58
CAPÍTULO 5. FILTRO DE KALMAN.....	59
5.1. INTRODUCCIÓN	59
5.2. MODELO DEL FILTRO DE KALMAN	59
5.3. ALGORITMO DEL FILTRO DE KALMAN APLICADO AL MODELO DINÁMICO DEL CAPACITOR IDEAL	62

5.4.	SIMULACIÓN DEL FILTRO DE KALMAN APLICADO AL <i>M2C</i> MONOFÁSICO	64
5.4.1	<i>Esquemas de filtro de Kalman para los condensadores del M2C monofásico</i>	65
5.4.2	<i>Resultados de pruebas de impacto de capacitancia</i>	68
5.5.	DISCUSIÓN	72
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....		74
6.1.	SUMARIO	74
6.2.	CONCLUSIONES	74
6.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....		77
ANEXO A. VALIDACIÓN DE LA CELDA SINAMICS		80
ANEXO B. DSPACE E INTERFAZ CONTROLDESK.....		89

Lista de Tablas

TABLA 1-2.1 COMPARACIÓN DE TOPOLOGÍAS DE CELDAS.....	16
TABLA 2-2.1 ESTADOS Y VOLTAJE DE SALIDA CONSIDERANDO DIRECCIÓN ix	17
TABLA 3-2.1 ESTADOS Y VOLTAJE DE SALIDA CONSIDERANDO DIRECCIÓN $-ix$	18
TABLA 1-3.1 VALORES NUMÉRICOS PARA SIMULACIÓN DEL $M2C$ MONOFÁSICO.....	29
TABLA 1-4.1 EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA ETAPA EXPERIMENTAL.	36
TABLA 2-4.1 TABLA DE CONEXIONES.	39
TABLA 2-4.1 PARÁMETROS PARA ETAPA EXPERIMENTAL.	49
TABLA 1-5.1 TIEMPOS DE IMPACTO Y VALOR DE CAPACITANCIA.	67
TABLA 2-5.1 VALOR DE CAPACITANCIA ACTUAL Y CAPACITANCIA PARA IMPACTO PRUEBA 1.	69
TABLA 3-5.1 VALOR DE CAPACITANCIA ACTUAL Y CAPACITANCIA PARA IMPACTO PRUEBA 2.	70
TABLA 1-A VALORES NUMÉRICOS SIMULACIÓN EXPERIMENTAL CELDA SINAMICS.....	80

Lista de Figuras

FIG. 1-2.1 TOPOLOGÍA DEL $M2C$ TRIFÁSICO PARA APLICACIONES EN HVDC [2].	14
FIG. 2-2.1 TOPOLOGÍAS DE SUBMÓDULOS PARA $M2C$.	15
FIG. 3-2.1 CIRCUITO ELÉCTRICO Y VOLTAJE DE SALIDA DE LA CELDA DE POTENCIA $M2C$ COMO SUBMÓDULO DOBLE [1].	17
FIG. 4-2.1 DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE i_x PARA LOS ESTADOS $S1 = 0, S2 = 1, S3 = 1$ Y $S4 = 0$.	19
FIG. 5-2.1 DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE i_x PARA PARA LOS ESTADOS $S1 = 1, S2 = 0, S3 = 1$ Y $S4 = 0$.	20
FIG. 6-2.1 DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE i_x PARA PARA LOS ESTADOS $S1 = 0, S2 = 1, S3 = 0$ Y $S4 = 1$.	21
FIG. 7-2.1 DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE i_x PARA LOS ESTADOS $S1 = 1, S2 = 0, S3 = 0$ Y $S4 = 1$.	22
FIG. 1-3.1 MODELO DEL $M2C$ MONOFÁSICO CON CELDAS SINAMICS IMPLEMENTADA EN SIMULINK.	24
FIG. 2-3.1 ESQUEMA DE SEÑAL TRIANGULAR.	25
FIG. 3-3.1 GENERACIÓN SEÑALES NIVEL PWM PARA ÉL $M2C$ MONOFÁSICO.	26
FIG. 4-3.1 ESQUEMA DE BALANCE DE CONDENSADORES DEL $M2C$ MONOFÁSICO.	28
FIG. 5-3.1 GRÁFICAS DE SEÑALES NIVEL IMPLEMENTADAS EN SIMULINK.	30
FIG. 6-3.1 GRÁFICAS DE VOLTAJE DEL $M2C$ MONOFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.	31
FIG. 7-3.1 VOLTAJE DE CARGA DEL $M2C$ MONOFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.	32
FIG. 8-3.1 GRÁFICA DE CORRIENTE DE CARGA DEL $M2C$ MONOFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.	33
FIG. 9-3.1 VOLTAJE EN LOS CONDENSADORES DEL $M2C$ MONOFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.	34
FIG. 1-4.1 TOPOLOGÍA DEL MÓDULO IGBT PARA SIMULACIÓN EXPERIMENTAL.	39
FIG. 2-4.1 ESQUEMA DE BALANCE.	41
FIG. 3-4.1 CONEXIÓN ENTRE GATE DRIVES Y MÓDULOS IGBT.	43
FIG. 4-4.1 CONEXIÓN ENTRE MÓDULOS IGBT Y DEMÁS DISPOSITIVOS.	45
FIG. 5-4.1 ESQUEMA GENERAL IMPLEMENTADO.	46
FIG. 6-4.1 ESQUEMA LCK PARA CÁLCULO DE CORRIENTE DE CARGA.	47
FIG. 7-4.1 SETUP DEL $M2C$ MONOFÁSICO REALIZADO EN LEPA 1.	48
FIG. 8-4.1 CORRIENTES DEL $M2C$ PRUEBA 1.	50
FIG. 9-4.1 VOLTAJES DEL $M2C$ PRUEBA 1.	52
FIG. 10-4.1 CORRIENTES DEL $M2C$ PRUEBA 2.	54
FIG. 11-4.1 VOLTAJES DEL $M2C$ PRUEBA 2.	56
FIG. 1-5.1 IMAGEN COMPLETA DEL FUNCIONAMIENTO DEL FILTRO DE KALMAN COMBINADO CON LAS ECUACIONES DE PREDICCIÓN Y ACTUALIZACIÓN.	61
FIG. 2-5.1 CONFIGURACIÓN DEL $M2C$ MONOFÁSICO APLICADO AL ALGORITMO DE KALMAN.	64

FIG. 3-5.1 ESQUEMA DE FILTRO DE KALMAN IMPLEMENTADO PARA LOS CONDENSADORES DE LA RAMA POSITIVA.	66
FIG. 4-5.1 ESQUEMA DE FILTRO DE KALMAN IMPLEMENTADO PARA LOS CONDENSADORES DE LA RAMA NEGATIVA.	66
FIG. 5-5.1 RESULTADOS PRUEBA 1 DE IMPACTOS DE CAPACITANCIA RAMA POSITIVA.	69
FIG. 6-5.1 RESULTADOS PRUEBA 1 DE IMPACTOS DE CAPACITANCIA RAMA NEGATIVA.	70
FIG. 7-5.1 RESULTADOS PRUEBA 2 DE IMPACTOS DE CAPACITANCIA RAMA POSITIVA.	71
FIG. 8-5.1 RESULTADOS PRUEBA 2 DE IMPACTOS DE CAPACITANCIA RAMA NEGATIVA.	71
FIG. 1-A GENERACIÓN SEÑAL DE REFERENCIA NIVEL.	81
FIG. 2-A ESQUEMA DE BALANCE DE CONDENSADORES PARA SIMULACIÓN EXPERIMENTAL.	81
FIG. 3-A CONEXIÓN ENTRE GATE DRIVES E IGBT.	82
FIG. 4-A CONEXIÓN ENTRE MÓDULOS IGBT Y DISPOSITIVOS.	83
FIG. 5-A ESQUEMA GENERAL IMPLEMENTADO.	84
FIG. 6-A SETUP DE LA CELDA SINAMICS REALIZADO EN LEPA 1.	85
FIG. 7-A VOLTAJE DE SALIDA DE LA CELDA SINAMICS.	86
FIG. 8-A CORRIENTE i_x DE LA CELDA SINAMICS.	87
FIG. 9-A VOLTAJE EN LOS CONDENSADORES DE LA CELDA SINAMICS.	88
FIG. 1-B DSPACE CON SUS RESPECTIVOS CANALES DE ENTRADAS Y SALIDAS.	89
FIG. 2-B BLOQUES UTILIZADOS PARA PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE SALIDAS DIGITALES.	90
FIG. 3-B BLOQUES UTILIZADOS PARA PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE SALIDAS ANALÓGICA.	91
FIG. 4-B BLOQUES UTILIZADOS PARA PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE ENTRADA ANALÓGICA.	91
FIG. 5-B EXPORTAR SIMULACIÓN HACIA CONTROLDESK.	92
FIG. 6-B ETAPA DE INCORPORAR ARCHIVO .SDF EN CONTROLDESK.	93
FIG. 7-B INTERFAZ CONTROLDESK.	93
FIG. 8-B PROYECTOS CONTROLDESK.	94
FIG. 9-B VARIABLES CONTROLDESK.	95
FIG. 10-B MENÚ CONTROLDESK.	95
FIG. 11-B ÁREA DE TRABAJO CONTROLDESK.	96
FIG. 12-B INFORMACIÓN DE VARIABLES CONTROLDESK.	96

Nomenclatura

V_P	: Voltaje rama positiva.
V_N	: Voltaje rama negativa.
R_r	: Resistencia parasita.
R_C	: Resistencia de carga.
i_{carga}	: Corriente de carga.
V_{c1} y V_{c2}	: Voltaje condensadores rama positiva.
V_{c3} y V_{c4}	: Voltaje condensadores rama negativa.
V_{dc}	: Voltaje de fuente DC.
L_C	: Inductancia de carga.
i_P	: Corriente rama positiva.
i_N	: Corriente rama negativa.
L_P	: Inductancia de rama positiva.
L_N	: Inductancia de rama negativa.
$C_{1,...4}$	: Condensadores rama positiva.
$C_{5,...8}$	: Condensadores rama negativa.
$S_{1,...4}$	: IGBT's rama positiva.
$S_{5,...8}$	: IGBT's rama negativa.
f_{tri}	: Frecuencia de señal triangular.
F	: Es la matriz de transición de estado.
B	: Es la matriz de entrada de control.
u	: Es la entrada de control.
P_c	: Es la matriz de covarianza del error de estimación.
Q_c	: Es la covarianza del ruido del sistema.
H	: Es la matriz de medición.
R_c	: Es la covarianza del ruido de medición.
z	: Es la medición en el tiempo k.
K	: Es la matriz de identidad.
I_c	: Corriente del condensador.
$k - 1$	: Valor en tiempo pasado.
k	: Valor actual.
C_{K1}, C_{K2}	: Valor de capacitancia impacto rama positiva.
C_{K3}, C_{K4}	: Valor de capacitancia impacto rama negativa.
R y Q	: Covarianzas.

Abreviaciones

Mayúsculas

M^2C	: Convertidor multinivel modular (en inglés modular multilevel converter).
PWM	: Modulación por ancho de pulsos (en inglés, pulse width-modulation).
IGBT	: Transistor bipolar de puerta aislada (en inglés, Insulated Gate Bipolar Transistor).
HVDC	: High Voltage Direct Current (en español, Alto Voltaje en Corriente Directa).
HVAC	: High Voltage Altern Current (en español, Alto Voltaje en Corriente Alterna).
DC	: Direct Current (en español, Corriente Directa).
AC	: Altern Current (en español, Corriente Alterna).
LEPA 1	: Laboratorio de electrónica de potencia aplicada.
LCK	: Ley de corriente de Kirchhoff.
P	: Positivo.
N	: Negativo.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción general

Actualmente en la industria existen tecnologías variadas en cuanto a la transmisión en HVDC, donde destacan las compuestas por tiristores e IGBT con diodo en antiparalelo, siendo cada vez más utilizadas las de IGBT ya que permiten conmutación controlada, autónoma y rápida, lo que ofrece una mayor flexibilidad y precisión en el control de la potencia, entre otras ventajas. Donde Siemens con su modelo comercial M^2C hace uso de está en celdas de baja tensión conectadas en serie, que generan un voltaje de salida a nivel de media tensión. Dentro del convertidor, cada celda se puede controlar individualmente y cada una tiene una unidad de almacenamiento de energía local que contribuye con una proporción del voltaje de salida. Eso es lo innovador de la tecnología M^2C siendo ventajas importantes la Flexibilidad, Disponibilidad y Escalabilidad de la topología [4] [6] [9] y [10].

El interés de Siemens en desarrollar la celda SINAMICS para hacer el mismo tipo de convertidor radica en la creación de una solución flexible, escalable y eficiente que se pueda adaptar a una amplia gama de aplicaciones industriales, mientras se mantiene en la vanguardia de la innovación tecnológica y cumple con las normativas de seguridad y eficiencia energética, la cual es utilizada en este trabajo con el fin de validar los parámetros en términos de voltaje de salida manteniendo un correcto balance en los condensadores de la celda [1].

la implementación de la topología de celda SINAMICS presenta desafíos en cuanto al balance de los condensadores involucrados en la estructura del convertidor, lo cual es crítico para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil del sistema. Este trabajo de investigación justifica su relevancia al proponer una estrategia de balance de los condensadores. Esto se llevará a cabo mediante el uso del software Matlab-Simulink para obtener los resultados de simulación en términos de voltaje y corriente. Posteriormente, se implementará un setup experimental en baja tensión, con el objetivo de validar los resultados obtenidos mediante simulación. Finalmente, se abarca el filtro de Kalman para ser aplicada en el M^2C monofásico, con el propósito de predecir la capacitancia de los condensadores presentes en la rama positiva y negativa del convertidor, lo cual permite tener un control de estos en tiempo real sin la necesidad de agregar sensores adicionales al sistema.

1.2. Trabajos Previos

En los trabajos previos al proyecto se considera la revisión bibliográfica en los temas de análisis de los M^2C , su funcionamiento, elementos y aplicaciones, topologías y control, además de la documentación disponible en la página oficial de SIEMENS con el fin de tener un acercamiento a la topología de la celda SINAMICS. Finalmente, el análisis del filtro de Kalman y aplicaciones.

1.3. Revisión bibliográfica

- ♣ *M2C technology*. (2023, October 4). Innomotics.
<https://www.innomotics.com/en/products/technology/m2c-technology.html>

El artículo publicado por Siemens en su página principal da a conocer la topología del M^2C con la incorporación de la celda SINAMICS, donde se permite visualizar su configuración mediante la conexión en serie de cuatro IGBT's y dos condensadores conectados en paralelo, este módulo puede generar hasta tres niveles de voltaje escalonados a la salida según los estados que se definan en los interruptores. Cabe destacar que los beneficios que ofrece esta topología son la flexibilidad, disponibilidad y escalabilidad, lo cual se debe a que estos módulos se interconectan en serie y de esta forma se puede obtener una forma de onda de voltaje cada vez más sinusoidal a la salida.

- ♣ R. Lizana, M. Perez, A. Dekka and B. Wu, "Capacitor voltage balancing method for modular multilevel converter with flying capacitor submodules," 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 60-65, doi: 10.1109/ICIT.2017.7913059.

En este artículo se propone un enfoque para el equilibrio de la tensión en el DC link. La implementación del algoritmo involucra funciones lógicas simples y fáciles de extender para el M^2C con una gran cantidad de submódulos por rama. Los estudios experimentales y de simulación se realizan en un M^2C basado en 3L-FC para validar la superioridad del enfoque que se propone. Donde el voltaje de los condensadores flotantes en cada submódulo debe controlarse en su valor de referencia

para generar la forma de onda del voltaje de salida de tres niveles. Donde el interés en este documento radica en la estructura del algoritmo de balance que se propone.

- ♣ M. Perez, S. Bernet, J. Rodriguez, S. Kouro, and R. Lizana, “Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 1, pp. 4–17, Jan 2015.

El artículo mencionado presenta las diferentes topologías de celdas de energía propuestas en la literatura para M^2C siendo de gran importancia conocer las diferentes alternativas al momento de elegir entre una topología u otra. también se presentan modelos para facilitar el análisis del convertidor, además propone estrategias de control asociadas al M^2C y aplicaciones en las cuales operan estos tipos de convertidores, destacando sus principales beneficios como lo son por ejemplo su modularidad, baja distorsión en voltaje de salida, su escalabilidad y robustez del sistema. Siendo todos estos beneficios son de gran importancia.

- ♣ A. Dekka, B. Wu, R. L. Fuentes, M. Perez, and N. R. Zargari, “Evolution of Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 5, no. 4, pp. 149–153, Dec 2017.

El artículo mencionado anteriormente expone el desarrollo de la topología del M^2C y sus modelos matemáticos de corrientes que describen su dinámica, se analiza la evolución de estos a lo largo de los años. También aborda las dificultades técnicas que determinan sus restricciones y las ventajas en los enfoques de control convencionales y predictivos. Además, el artículo presenta ejemplos de cómo se utiliza el M^2C en diferentes campos y ofrece una visión de las tendencias que se esperan en el futuro. Con el objetivo de orientar la búsqueda de nuevas tecnologías que mejoren la operación actual.

- ♣ Salinas, Fernando & Gonzalez, Mario & Escalante, Miguel. (2010). "Voltage balancing scheme for flying capacitor multilevel converters". Power Electronics, IET. 6. 10.1109/CIEP.2010.5598912.

Este estudio propone un esquema de balance de voltaje para M^2C con capacitores flotantes. La estrategia se basa en la redundancia de cambios de estados. Mediante el uso de expresiones analíticas, los autores estudian las propiedades de equilibrio de cada estado de conmutación. Luego, basándose en dichas propiedades, eligen el estado de conmutación que impulsa los voltajes del capacitor hacia sus valores de referencia y, simultáneamente, garantizará el nivel de voltaje deseado. El método es particularmente atractivo para aplicaciones donde no se utiliza el típico control de modulación de ancho de pulso, como control directo de par, control de histéresis y control de modos deslizantes.

- ♣ A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen and G. D. Demetriades, "Modular Multilevel Converters for HVDC Applications: Review on Converter Cells and Functionalities," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 1, pp. 18-36, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2327641.

En este artículo, se utiliza el principio de modularidad para derivar las diferentes topologías de M^2C de fuente de corriente y de voltaje, Se centra en aplicaciones de alta potencia y específicamente en sistemas HVDC. Las celda convertidoras derivadas se tratan como bloques de construcción y contribuyen a la modularidad del sistema. Al combinar los diferentes bloques de construcción, es decir, las celdas del convertidor se derivan y analizan en profundidad una variedad de topologías. Además, al aplicar el principio de modularidad a nivel de sistema, se introducen varios tipos de convertidores de alta potencia. Se estudia en profundidad la modularidad de dichos sistemas.

- ♣ S. Debnath, et al., "Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 1, pp. 37–53, Jan 2015, doi:10.1109/TPEL.2014.2309937.

La principal contribución de este estudio es analizar una descripción general de los conceptos básicos de operación del M^2C junto con sus desafíos de control, y se presenta una revisión de las estrategias y tendencias de control más modernas. Finalmente, se destacan las aplicaciones de este y sus desafíos en las diferentes topologías de circuitos. Estas configuraciones del M^2C constan de estructuras de convertidores de submódulos y miembros de la familia M^2C . De esta manera, las aplicaciones se generalizan y el resultado es reducir a la mitad el tamaño y el costo, reducir las pérdidas de conducción y conmutación y aumentar la confiabilidad del sistema.

- ♣ Zhongxi Li, Ricardo Lizana, Angel V. Peterchev, Senior Member, IEEE, Stefan M. Goetz, "Distributed Balancing Control for Modular Multilevel Series/Parallel Converter with Capability of Sensorless Operation" in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017.

Este artículo aborda la configuración de la topología de celdas MMSPC, describiendo cómo se establece la conexión entre los condensadores de una rama de un convertidor. Se destaca especialmente la conexión en serie y paralelo, que resulta esencial para mantener un equilibrio en las tensiones de los condensadores sin necesidad de supervisar voltajes ni medir corrientes en la rama para lograr una operación óptima, lo que asegura un buen funcionamiento y estabilidad del convertidor en cuestión. Además, se describe el tipo de modulación requerido para lograr los estados mencionados anteriormente, lo cual es un aspecto fundamental en el desarrollo de la topología.

- ♣ S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodríguez, M. A. Perez, and J. I. Leon, “Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug 2010.

El objetivo de este artículo es agrupar y revisar las contribuciones recientes, con el fin de establecer el estado actual del arte y las tendencias de la tecnología, para brindar una revisión integral y profunda de dónde se encuentra y se dirige la tecnología de los M^2C . El artículo presenta primero una breve descripción de los convertidores bien establecidos, fuertemente orientados a su estado actual en aplicaciones industriales, para luego centrar la discusión en los nuevos convertidores que han llegado a la industria. También se discuten nuevas topologías prometedoras, se abordan los avances recientes realizados en modulación y control de estos convertidores.

- ♣ J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng, “Multi-level inverter: a survey of topologies, controls, and applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.49, no.4, pp.724–738, Aug.2002.

Este artículo presenta las topologías más importantes, como lo es el inversor fijado por diodo, fijado por condensador (condensador volante) y multicelda en cascada con fuentes de CC separadas. También se analizan topologías emergentes como celdas híbridas asimétricas e inversores multinivel con conmutación suave. Este artículo también presenta los métodos de control y modulación más relevantes desarrollados para esta familia de convertidores: modulación por ancho de pulso sinusoidal multinivel, eliminación selectiva de armónicos multinivel y modulación de vector espacial. Se dedica especial atención a las aplicaciones más recientes y relevantes de estos convertidores.

- ♣ Dekka, Apparao & Wu, Bin & Zargari, Navid & Fuentes, Ricardo. (2015). "Dynamic Voltage Balancing Algorithm for Modular Multilevel Converter: A Unique Solution". IEEE Transactions on Power Electronics. 31. 1-1. 10.1109/TPEL.2015.2419881.

En este artículo se propone un nuevo algoritmo de balanceo de voltaje dinámico generalizado junto con una estructura simple de modulación de ancho de pulso. Con la estructura propuesta, el algoritmo de equilibrio de voltaje dinámico se puede implementar fácilmente con cualquier tipo de esquema de modulación de ancho de pulso basado en portadora (incluida la modulación de ancho de pulso con desplazamiento de nivel y de fase) sin ninguna modificación. además, Se presenta el rendimiento del algoritmo de equilibrio de voltaje propuesto para M^2C con submódulos de capacitores flotantes de tres niveles (MMC-3L-FC).

- ♣ O. Abushafa, S. Gadoue, M. Dahidah, D. Atkinson and S. Ethni, "Control strategies for capacitor voltage balancing in modular multilevel converters," 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC.2016.7478938.

Se proponen diferentes esquemas de algoritmos de clasificación convencionales modificados con baja complejidad para equilibrar los voltajes de los capacitores del submódulo (SM) para el M^2C . En este estudio se investigan dos procedimientos diferentes. La idea principal es lograr un equilibrio de voltaje dentro de los brazos del M^2C con menos sensores de corriente, la ventaja de estos métodos de control sin sensores es que simplifican las comunicaciones de hardware en general. Además, Se realizan análisis de simulación de un M^2C monofásico de cuatro niveles para mostrar la efectividad de los métodos propuestos.

- ♣ Islam, Didarul & Razzaghi, Reza & Bahrani, Behrooz. (2019). Arm-Sensorless Sub-Module Voltage Estimation and Balancing of Modular Multilevel Converters. IEEE Transactions on Power Delivery. PP. 1-1. 10.1109/TPWRD.2019.2931287.

En la literatura se encuentran un número limitado de estudios donde se reduce la cantidad de sensores mediante la incorporación de observadores para estimar los voltajes de los SM. Sin embargo, la dependencia de los sensores no se elimina por completo. En este artículo, se presenta una estimación de voltajes de SM basada en el filtro de Kalman, la cual no requiere ningún sensor de voltaje para medir el voltaje del brazo. Por lo tanto, este método simplifica considerablemente la implementación de los M^2C . Se llevan a cabo extensas simulaciones y casos de prueba experimentales para validar el rendimiento del método propuesto de estimación de voltaje de SM. Las evaluaciones de rendimiento verifican la precisión y robustez del método propuesto para diversos escenarios de prueba realizados en un amplio rango de frecuencias de muestreo.

- ♣ Welch, Greg & Bishop, Gary. (2006). An Introduction to the Kalman Filter. Proc. Siggraph Course. 8.

En el siguiente artículo se aborda una introducción al filtro de Kalman que está compuesto por un conjunto de ecuaciones matemáticas que proporciona un medio computacional (recursivo) eficiente para estimar el estado de un proceso, de una manera que minimice la media del error al cuadrado. El filtro es muy potente en varios aspectos: soporta estimaciones de estados pasados, presentes e incluso futuros, y puede hacerlo incluso cuando se desconoce la naturaleza precisa del sistema modelado. El propósito de este artículo es proporcionar una introducción práctica a el filtro discreto de Kalman. Esta introducción incluye una descripción y discusión sobre el filtro de Kalman discreto básico, y sobre el filtro de Kalman extendido.

- ♣ O. S. H. M. Abushafa, M. S. A. Dahidah, S. M. Gadoue and D. J. Atkinson, "Submodule Voltage Estimation Scheme in Modular Multilevel Converters with Reduced Voltage Sensors Based on Kalman Filter Approach," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 9, pp. 7025-7035, Sept. 2018.

En este paper se presenta un método de estimación de voltaje en los modulo del M^2C , se emplea el algoritmo del filtro de Kalman para la estimación de voltaje, desarrollando el modelo dinámico lineal del M^2C de voltaje. Con el fin de disminuir los sensores y lograr equilibrar el voltaje del convertidor, se realizan pruebas de simulación como también experimentales y la validación ante estados dinámicos, obteniendo como resultados una estimación precisa del voltaje utilizando solo un sensor de voltaje por brazo. Posibilitando la disminución del costo del convertidor y complejidad

1.3.1 Discusión

los sistemas de almacenamiento de energía han emergido como componentes cruciales en la transición hacia una red eléctrica más sostenible y resiliente. Paralelamente, los avances en la electrónica de potencia han dado lugar a tecnologías innovadoras como los M^2C que ofrecen nuevas posibilidades para la gestión y conversión de energía eléctrica a gran escala. Entre estas innovaciones, la topología de celda SINAMICS, desarrollada por Siemens, se destaca como una solución prometedora para aplicaciones de alta potencia y eficiencia [1].

La importancia de los convertidores de potencia y su evolución [4], en una amplia gama de aplicaciones, y sus Avances recientes y aplicaciones [9], en la industria, por lo que analizar y estudiar la mejora continua es relevante y de gran impacto.

El estudio de las topologías, aplicaciones y operación de los M^2C [6], [7], [3] y [10] son claves para analizar una descripción general de los conceptos básicos de operación del M^2C junto con sus desafíos de control y revisión de las estrategias y tendencias de control más modernas que involucran a dicho convertidor.

El algoritmo de equilibrio de voltaje de los condensadores del M^2C para lograr la estabilidad del sistema es una parte fundamental [2], [5], [8], [11] y [12], debido a que los semiconductores abarcan alrededor del 34% de fallas en un convertidor, le sigue en la lista el condensador, este porcentaje puede variar según su aplicación (20-30%), sin embargo, está posicionado como segundo elemento más propenso a fallar en un convertidor de potencia por lo que lo hace un elemento vulnerable, siendo necesario hacer un control adecuado.

La aplicación del filtro de Kalman en monitoreo o estimación de señales eléctricas en la electrónica de potencia, se pueden ver en [13] y [15], presentan resultados alentadores, posibilitan una gama amplia de aplicaciones en sistemas con ruido. La expresión del modelo dinámico donde es aplicado el filtro de Kalman es de gran relevancia para obtener resultados de estimación, puesto que un mal modelo tendrá resultados erróneos.

Todos los aspectos mencionados anteriormente servirán como punto de partida para el desarrollo teórico de una topología del M^2C monofásico basada en celdas SINAMICS, la cual destaca en su voltaje de salida de tres niveles y en su configuración, la cual permite la conexión de dos condensadores conectados en paralelo a través del punto medio de la celda permitiendo una distribución del voltaje equitativo que puede almacenar cada condensador. El aporte de este trabajo es validar dicha topología mediante las simulaciones correspondientes y de manera obtener los resultados acorde a los parámetros establecidos.

1.4. Hipótesis de Trabajo

Se espera que por medio del uso de la topología de la celda SINAMICS, y una correcta estrategia de balance de los condensadores presentes en cada rama del M^2C monofásico, se logré una forma de onda de voltaje de salida acorde a la cantidad de módulos, siendo importante obtener resultados similares al realizar las simulaciones mediante Matlab-Simulink y de forma experimental de dicho modelo.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Estudiar e implementar una configuración de un M^2C monofásico mediante simulación y de forma experimental haciendo uso de una topología de celda SINAMICS de Siemens, con el propósito de obtener un correcto balance en los condensadores de cada módulo.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Validar operación mediante simulación de módulos SINAMICS.
- Implementar método de balance de capacitores por modulo.
- Validar operación de M^2C en base a celda SINAMICS.
- Simular una estimación de Kalman de los valores de capacitancia del M^2C .

1.6. Alcances y Limitaciones

Si bien un M^2C para aplicaciones en HVDC poseen un gran número de celdas por rama (>200), para este caso se realizarán simulaciones con un máximo de una celda por rama, dado a que los resultados obtenidos son escalables en caso de replicar una operación con un mayor número de celdas.

Para comenzar, se llevará a cabo la presentación de la topología de la celda SINAMICS de Siemens destacando su configuración, voltaje de salida y efectos según la dirección de la corriente.

Se desarrollará un esquema de balance para la topología de la celda SINAMICS presentes en la configuración del M^2C monofásico con el propósito de obtener un correcto balance en el voltaje de los condensadores. Posterior a ello se implementará mediante Matlab-Simulink para la validación del M^2C mediante simulación y posteriormente de manera experimental.

La implementación del esquema de balance del M^2C para la simulación experimental será desarrollado mediante el uso del software Matlab-Simulink, y se exportará el control hacia la Dspace-MicrolabBox y será monitoreada por medio del software ControlDesk en tiempo real.

Para finalizar, se llevará a cabo la simulación del M^2C monofásico junto al filtro de Kalman para los condensadores presentes en la rama positiva y negativa del convertidor para diferentes impactos de capacitancia en condiciones ideales, aplicando un aumento o disminución en valor de capacitancia de estos con el fin de poder ver el comportamiento del filtro antes estas variaciones y poder estimar dicho valor durante el tiempo en que se encuentren en funcionamiento.

1.7. Temario y Metodología

En el primer capítulo, se presenta la introducción general de este proyecto, destacando la tecnología de los M^2C debido a las importantes ventajas que presenta. Para posteriormente dar paso a la topología de celda SINAMICS de Siemens la cual será implementada en una configuración de M^2C monofásico con el propósito de obtener resultados mediante simulación y de forma experimental,

se explica a grandes rasgos el esquema de filtro de Kalman que será aplicado a los condensadores presentes en el convertidor. Posteriormente se presenta una revisión bibliográfica la cual es la principal fuente teórica para entender el contexto y poder afrontar este proyecto, Esta revisión bibliográfica abarca documentos, trabajos y libros sobre la topología de la celda SINAMICS de Siemens, métodos de balance de voltaje para capacitores de un M^2C , evolución de las topologías y esquemas de control para M^2C , conceptos de filtro de Kalman. Además de la respectiva discusión de dicho capítulo, se introduce el proyecto de habilitación profesional planteado con los objetivos general y específicos a cumplir, sus alcances y limitaciones, además del temario y metodología de este trabajo.

En el segundo capítulo, se llevará a cabo un examen simple del estado actual de las diferentes topología de la celda que existen para aplicaciones en HVDC, haciendo hincapié en la topología SINAMICS de Siemens para verificar los posibles beneficios que este tipo de celdas podría brindar, además, se estudia el efecto de la corriente a través de la celda para los diferentes estas de conmutación y como se genera cada nivel de voltaje de salida respectivo.

En el tercer capítulo, se presenta la configuración del M^2C monofásico que será implantado en este trabajo, además, se diseñará una estrategia balance destinada a lograr una estabilidad adecuada en los condensadores de la celda SINAMICS presentes en el modelo del M^2C [11]. Se llevará a cabo la configuración necesaria para obtener resultados de forma simulada mediante Matlab-Simulink del modelo propuesto.

En el cuarto capítulo, se implementará de forma experimental en condiciones de baja potencia utilizando las topologías descritas un Setup del M^2C monofásico en el laboratorio de LEPA 1, con el propósito de validar los resultados obtenidos mediante simulación en el capítulo 3.

En el quinto capítulo se realiza el estudio del filtro de Kalman y el desarrollo del algoritmo, se propone el modelo dinámico respecto a las variables eléctricas del condensador, luego se simula en conjunto al M^2C monofásico para los condensadores presentes en la rama positiva y negativa de este, registrando los resultados obtenidos para dos casos de prueba.

Finalmente, en el sexto capítulo se presentarán las conclusiones globales pertinentes a los resultados, trabajos futuros y referencias bibliográfica utilizadas en este trabajo.

Capítulo 2. Topología de la celda SINAMICS

2.1. Introducción

En este capítulo, se presenta la topología de la celda SINAMICS de Siemens [1], la cual será utilizada para propósitos de este trabajo, en el cual se destaca su configuración, voltaje de salida y efectos según la dirección de la corriente, dichos conceptos importantes para tener en cuenta antes de interiorizarse en la configuración del M^2C monofásico.

2.2. Topologías de submódulos para M^2C

En la Fig. 1-2.1, se presenta el modelo del M^2C trifásico con el objetivo de comprender la configuración, cabe destacar que para propósitos de este trabajo solo se abordara una topología monofásica.

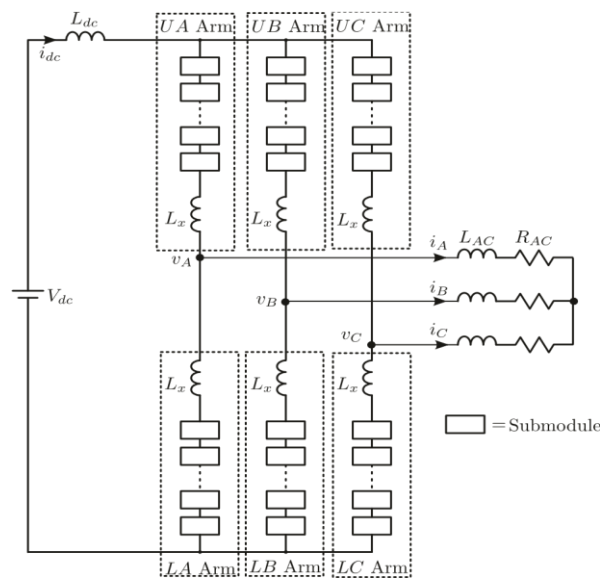


Fig. 1-2.1 Topología del M^2C trifásico para aplicaciones en HVDC [2].

Los submódulos del M^2C pueden presentar diversas configuraciones, pero todas ellas comparten la característica de operar con uno o más condensadores flotante en el lado DC de cada submódulo [3]. Entre estas configuraciones, las más comúnmente empleadas incluyen:

- **Full-bridge:** Esta topología es capaz de entregar 3 niveles de voltaje de salida $-V_{dc}$, 0 y V_{dc} , la cual se muestra en la Fig. 2-2.1 (a).
- **Half-bridge:** Esta topología es capaz de entregar 2 niveles de voltaje de salida, siendo estos niveles 0 y V_{dc} la cual se muestra en la Fig. 2-2.1 (b).
- **NPC:** Esta topología al igual que el Full-bridge es capaz de entregar 3 niveles de voltaje de salida, la cual se muestra en la Fig. 2-2.1 (c).
- **Flying-Capacitor:** topología capaz de entregar 3 niveles de voltaje de salida al igual que el mencionados anteriormente con la diferencia que opera con condensadores flotantes en paralelo, su topología se presenta en la Fig. 2-2.1 (d).
- **Celda SINAMICS:** Esta topología genera 3 niveles de voltaje de salida, similar en la configuración con el Flying-Capacitor con la diferencia en la configuración de los condensadores flotantes van conectados en serie a través de un punto medio, su topología se presenta en la Fig. 2-2.1 (e).

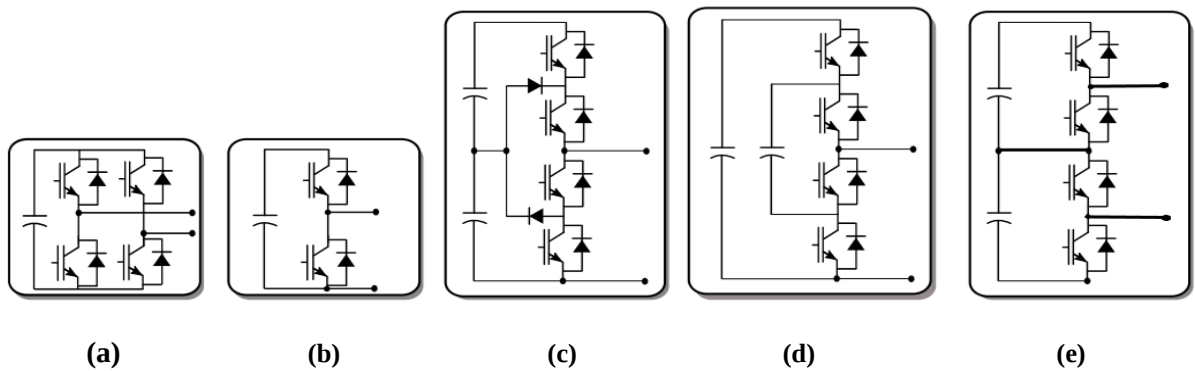


Fig. 2-2.1 Topologías de submódulos para M^2C .
 (a) Full-bridge, (b) Half-bridge, (c) NPC, (d) Flying capacitor, (e) Celda SINAMICS.

Tabla 1-2.1 Comparación de topologías de celdas.

Topología	Niveles de voltaje de salida	Condensadores flotantes
Full-Bridge	3	1
Half-Bridge	2	1
NPC	3	2
Flying Capacitor	3	2
Celda SINAMICS	3	2

Las topologías descritas anteriormente se muestran con el fin de poder ver las diferencias y evolución en sus configuraciones, que presenta cada una respecto a la otra. Pero, como el propósito de este trabajo es estudiar e implementar la topología de celda SINAMISC de Siemens, se procede a continuación al estudio y análisis de dicha topología.

2.3. Celda SINAMICS.

Se presenta en la Fig. 3-2.1, el esquema del submódulo SINAMICS de Siemens el cual cuenta con cuatro semiconductores IGBT's conectados en serie, además de dos condensadores conectados en paralelo a través del punto medio.

Dependiendo del estado que se definan en los semiconductores (S_1, S_2, S_3 y S_4), sea “Interruptor cerrado = 1” o “ interruptor abierto = 0”, se obtendrá a la salida un voltaje de hasta tres niveles. Siendo la amplitud de voltaje máximo para la configuración dada igual a $V_{C1} + V_{C2}$, característica con la cual se diferencia con las topologías descritas anteriormente.

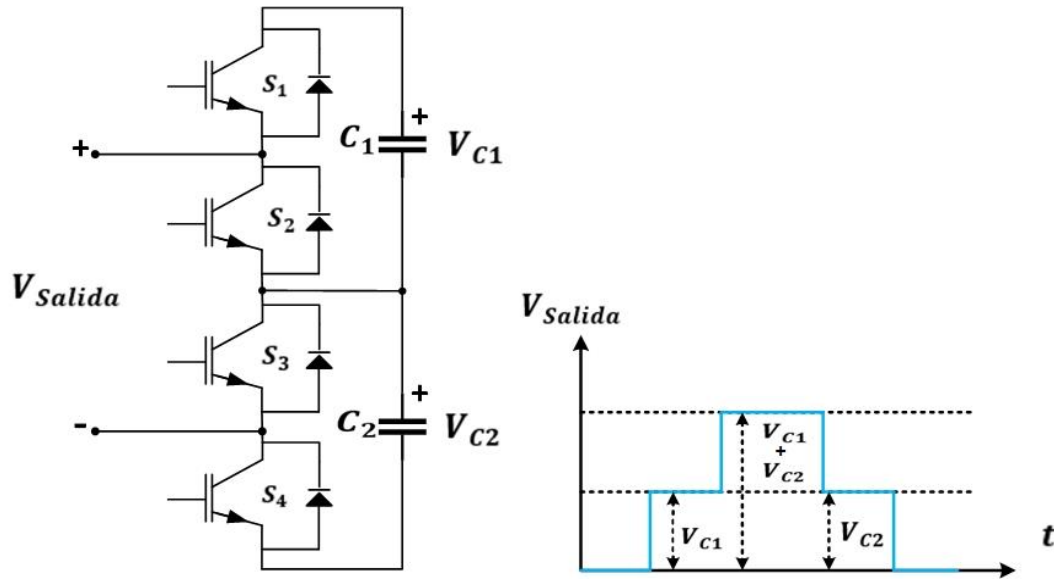


Fig. 3-2.1 Circuito eléctrico y voltaje de salida de la celda de potencia M^2C como submódulo doble [1].

En la Tabla 2-2.1 y 3-2.1, se presentan las combinaciones validas de la celda de la Fig. 3-2.1 dependiendo de los estado que se definan en los semiconductores, además se establece una dirección en la cual circulará la corriente a través este logrando de esta forma cargar o descargar dichos condensadores.

Cabe destacar que el signo de la corriente ya sea dirección positiva (i_x) o negativa ($-i_x$) que se muestra en la tabla, solo establece el sentido y/o dirección de esta a través de la celda, lo cual permite cargar o descargar los condensadores.

Tabla 2-2.1 Estados y voltaje de salida considerando dirección i_x .

Estados	S_1	S_2	S_3	S_4	$i_x > 0$	$V_{condensador}$	V_{out}
1	0	1	1	0	i_x	N/A	0
2	1	0	1	0	i_x	Carga	V_{C1}
3	0	1	0	1	i_x	Carga	V_{C2}
4	1	0	0	1	i_x	Carga	$V_{C1} + V_{C2}$

Tabla 3-2.1 Estados y voltaje de salida considerando dirección $-i_x$.

Estados	S_1	S_2	S_3	S_4	$i_x < 0$	$V_{condensador}$	V_{out}
1	0	1	1	0	$-i_x$	N/A	0
2	1	0	1	0	$-i_x$	descarga	V_{C1}
3	0	1	0	1	$-i_x$	descarga	V_{C2}
4	1	0	0	1	$-i_x$	descarga	$V_{C1} + V_{C2}$

2.4. Análisis de efecto según la dirección de la corriente.

Se presenta el análisis de efecto según la dirección que se definió en las Tablas 1-2.1 y 2-2.1 de la corriente que circula a través de la celda, en las siguientes figuras se ilustra este comportamiento para ambos casos (i_x o $-i_x$).

2.4.1 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = 0[V]$

En la configuración de la Fig. 4-2.1, se observa que los semiconductores S_1 y S_4 se encuentran abiertos, mientras que S_2 y S_3 cerrados, debido a esto la corriente circula a través de estos dos últimos. logrando concluir con este análisis que en esta configuración para ambos casos no se permite cargar o descargar los condensadores, por lo tanto, el voltaje de salida de la celda será $V_{salida} = 0 [V]$.

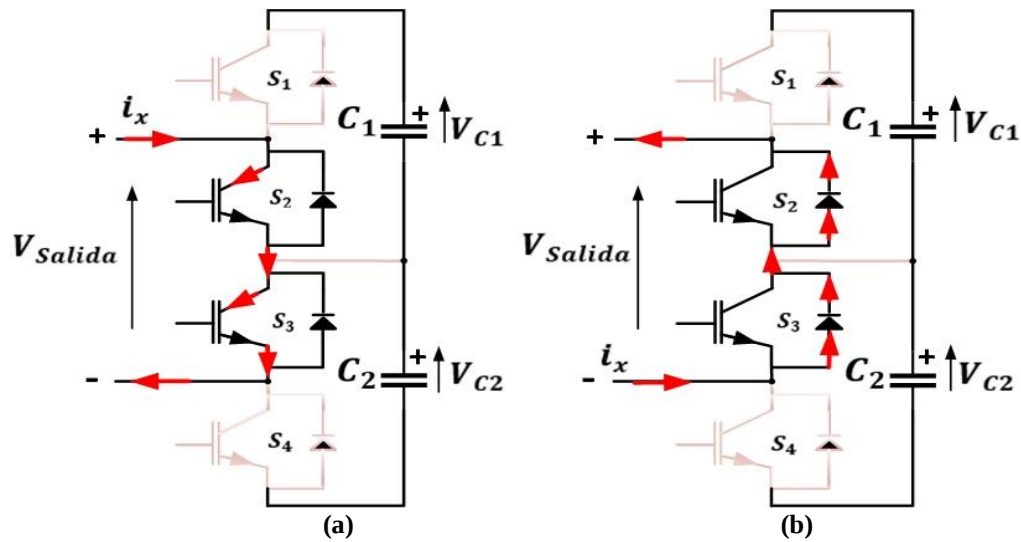


Fig. 4-2.1 Dirección de la corriente i_x para los estados $S_1 = 0$, $S_2 = 1$, $S_3 = 1$ y $S_4 = 0$.
(a) Dirección positiva (i_x), **(b)** Dirección negativa ($-i_x$).

2.4.2 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = V_{c1}$ [V]

En este caso se cuenta con S_2 y S_4 abiertos, mientras que S_1 y S_3 cerrados, considerando la Fig. 5-2.1 (a), la corriente se define de manera positiva circulando a través del interruptor S_1 y posteriormente hacia el condensador V_{c1} el cual procederá a cargarse. El voltaje que se obtiene en la salida de la celda es $V_{salida} = V_{c1}$ [V].

En el caso de la Fig. 5-2.1 (b), se modifica la dirección de la corriente i_x por lo que ingresa por el negativo del condensador V_{c1} , por ende, este procederá a descargarse. el voltaje que se verá a salida será $V_{salida} = V_{c1}$ [V]. Considerando esta dirección de corriente el diodo del switch S_3 no conduce ya que el IGBT esta permitiendo el paso de la corriente en la dirección que corresponde.

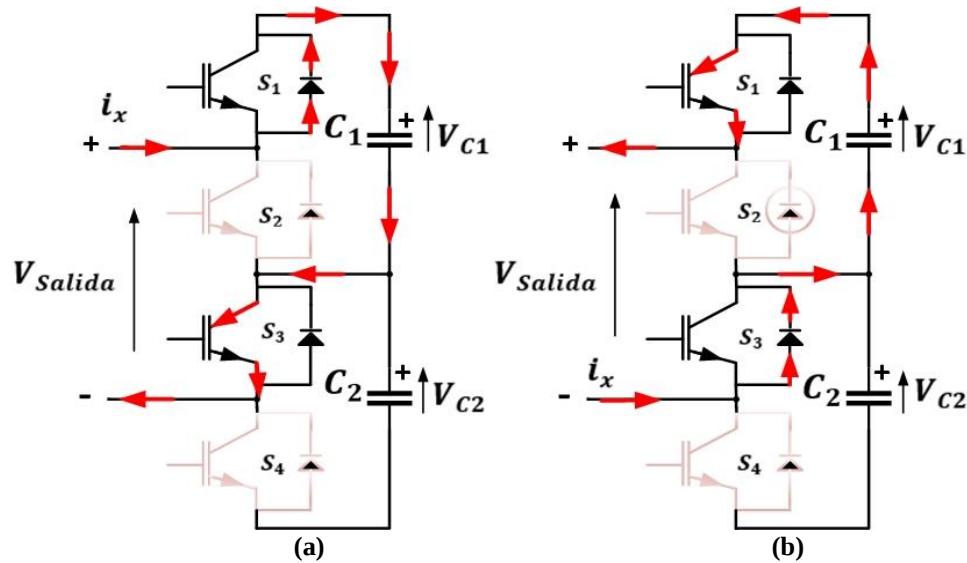


Fig. 5-2.1 Dirección de la corriente i_x para para los estados $S_1 = 1$, $S_2 = 0$, $S_3 = 1$ y $S_4 = 0$.
(a) Dirección positiva (i_x), (b) Dirección negativa ($-i_x$).

2.4.3 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = V_{c2}$ [V]

Los interruptores S_1 y S_3 están abiertos, mientras que S_2 y S_4 cerrados, para la Fig. 6-2.1 (a) la corriente ingresa por S_2 y luego por el positivo del condensador V_{c2} el cual procede a cargarse. El voltaje a la salida de la celda será $V_{salida} = V_{c2}$ [V].

En la Fig. 6-2.1 (b) la corriente se define en sentido opuesto ingresando por el interruptor S_4 y posteriormente por el negativo del condensador V_{c2} el que se descargará durante el proceso, debido a esto el voltaje a la salida será $V_{salida} = V_{c2}$ [V].

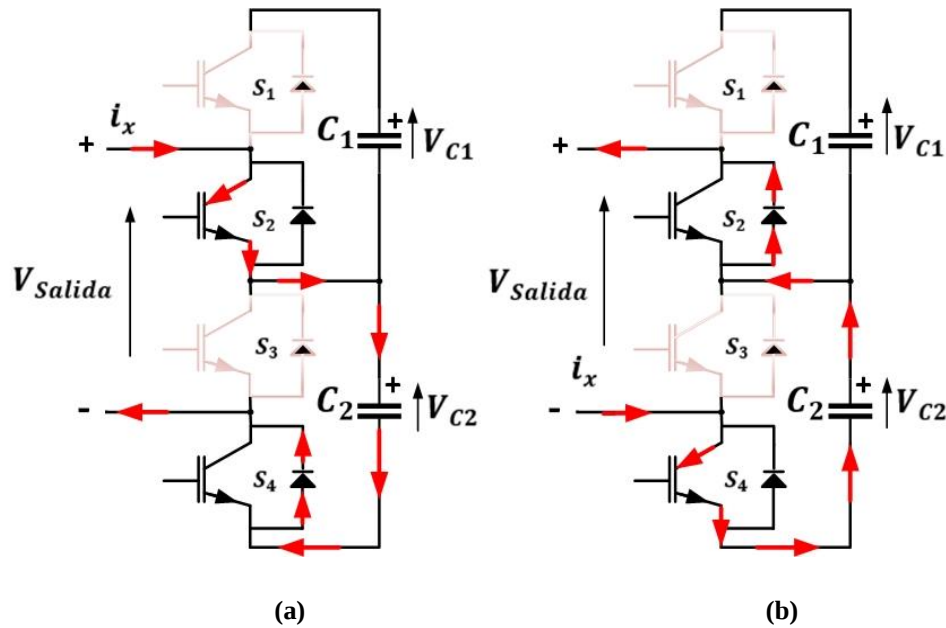


Fig. 6-2.1 Dirección de la corriente i_x para para los estados $S_1 = 0, S_2 = 1, S_3 = 0$ y $S_4 = 1$.
(a) Dirección positiva (i_x), (b) Dirección negativa ($-i_x$).

2.4.4 Estados para obtener el nivel de voltaje $V_{salida} = V_{c1} + V_{c2}$ [V]

S_2 y S_3 se encuentran abiertos, mientras que S_1 y S_4 cerrados, la corriente en el caso de la Fig. 7-2.1 (a) circula a través de los condensadores V_{c1} y V_{c2} en dirección positiva logrando que carguen durante el proceso, esta configuración permite obtener a la salida un voltaje igual a $V_{salida} = V_{c1} + V_{c2}$ [V].

En el caso de la Fig. 7-2.1 (b), la corriente se define en sentido opuesto (la corriente es la misma que el caso anterior, solo se modifica la dirección) circulando a través de los condensador V_{c1} y V_{c2} en dirección negativa, por lo que estos se descargan, finalmente el voltaje a la salida será $V_{salida} = V_{c1} + V_{c2}$ [V].

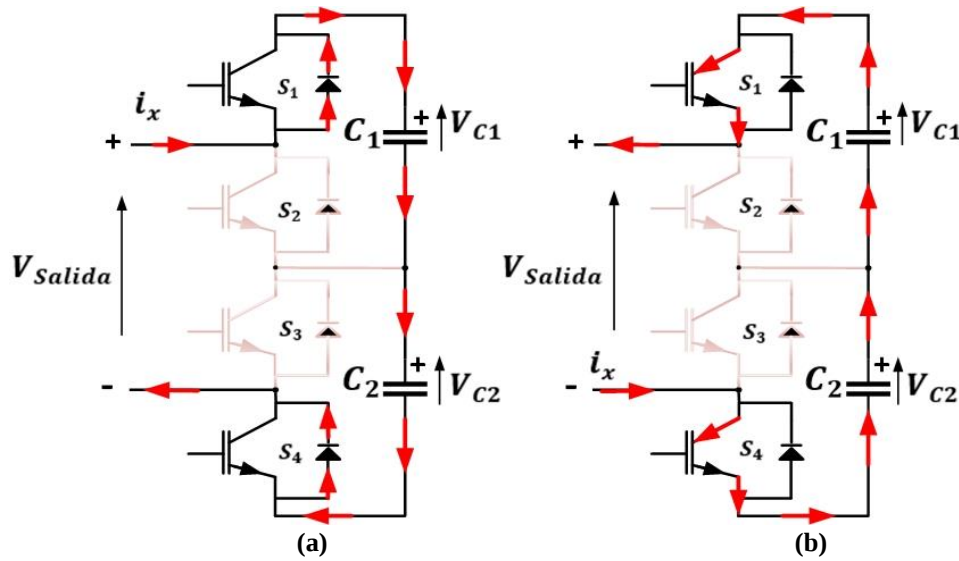


Fig. 7-2.1 Dirección de la corriente i_x para los estados $S_1 = 1$, $S_2 = 0$, $S_3 = 0$ y $S_4 = 1$.
(a) Dirección positiva (i_x), (b) Dirección negativa ($-i_x$).

2.5. Discusión

La celda SINAMICS se distingue por su capacidad de operar con dos condensadores conectados en paralelo a través de un punto medio de la celda, lo que le permite alcanzar un nivel de voltaje de salida máximo igual a la suma de los voltajes en ambos condensadores. Este diseño ofrece una ventaja significativa en términos de control de la energía almacenada en los condensadores y la capacidad de gestionar la dirección de la corriente para cargar o descargar los mismos.

El análisis de los estados de operación de la celda SINAMICS, según la dirección de la corriente, revela cómo el control adecuado de los switch permite obtener diferentes niveles de voltaje de salida, que van desde 0 [V] hasta la suma de los voltajes en los dos condensadores. Esta flexibilidad es fundamental para aplicaciones que requieren una alta calidad de energía y un control preciso del voltaje.

En resumen, la celda SINAMICS representa una opción robusta y versátil para la implementación en M^2C , ofreciendo un control preciso sobre los niveles de voltaje de salida, la gestión de la energía almacenada en los condensadores y su capacidad para manejar diferentes estados la convierte en una topología idónea para aplicaciones avanzadas en electrónica de potencia.

Capítulo 3. Topología del M^2C monofásico

3.1. Introducción

El M^2C se fundamenta en la conexión en serie de módulos, lo que le permite ser aplicado en sistemas de potencia de voltaje medio y alto, garantizando una alta calidad de energía en función de la cantidad de estos que sean utilizados [7]. donde cada uno se enlaza en serie con el siguiente, formando tanto la rama positiva (superior) como la rama negativa (inferior), cada una compuesta por N módulos.

La rama positiva se conecta en su extremo superior al polo positivo de la fuente de alimentación DC, mientras que la rama negativa se conecta en su extremo inferior al polo negativo. Bajo esta configuración, dos ramas se fusionan para constituir una fase del convertidor, y el punto medio corresponde a la salida del convertidor monofásico respectivo, en donde se conecta una carga del tipo RL .

3.2. Esquema de balance de los condensadores del M^2C monofásico con celda SINAMICS

Debemos abordar en primer lugar el modelo el cual será implementado en el software de Matlab-Simulink, este se muestra en la Fig. 1-3.1 considerando una carga RL con los siguientes parámetros: $R_C = 100 [\Omega]$ y $L_C = 15 [mH]$, el objetivo es ver el comportamiento de la corriente y voltaje tanto de la rama positiva y negativa, balance de los condensadores y además el voltaje en la carga. Cabe destacar que estos resultados son de suma importancia para la validación de dicho modelo.

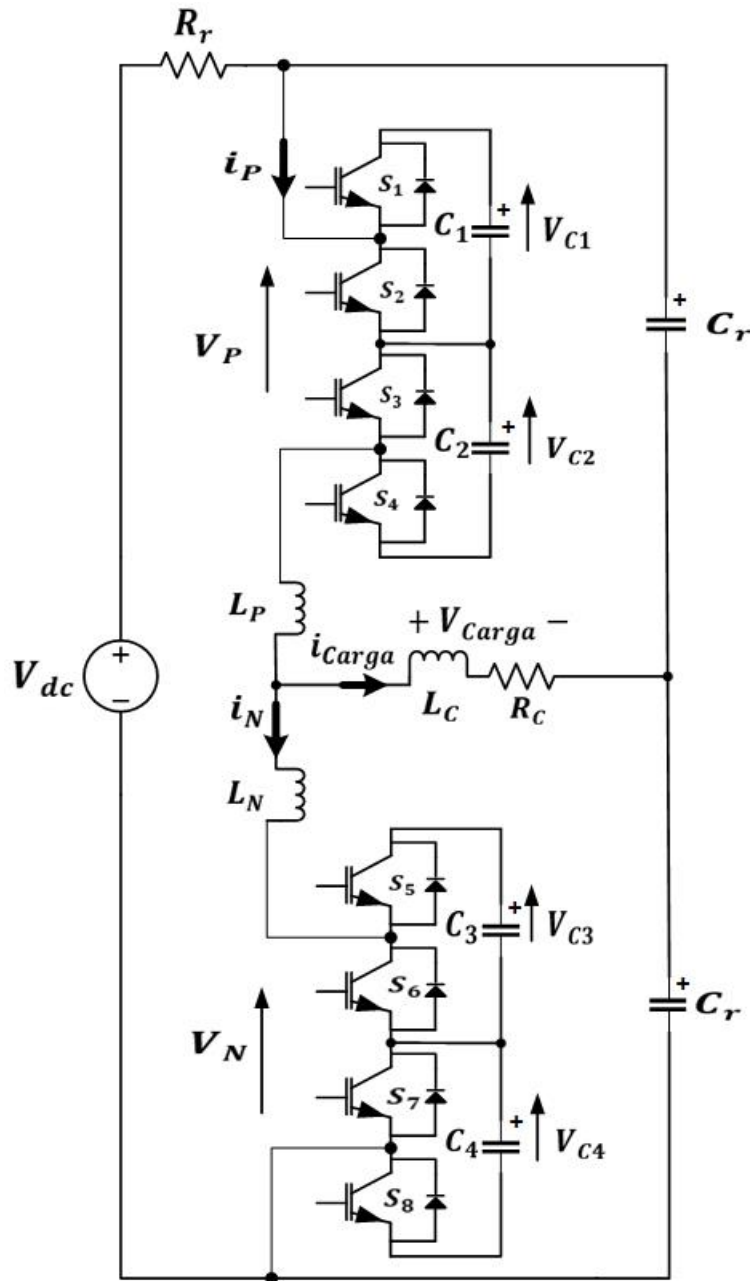


Fig. 1-3.1 Modelo del M^2C monofásico con celdas SINAMICS implementada en Simulink.

El modelo del M^2C monofásico que se exhibe en la Fig. 1-3.1, representa el esquema el cual será implementado mediante simulación y posteriormente de manera experimental haciendo uso de los equipos e instrumentos que se presentan en el capítulo 4.

En este ítem se presenta la construcción de la modulación PWM para el M^2C monofásico realizada en Matlab-Simulink, comenzado con la señal triangular y posteriormente se procederá con las señales nivel tanto de la rama positiva como negativa necesarias para generar el esquema de balance de los condensadores.

3.2.1 Modulación

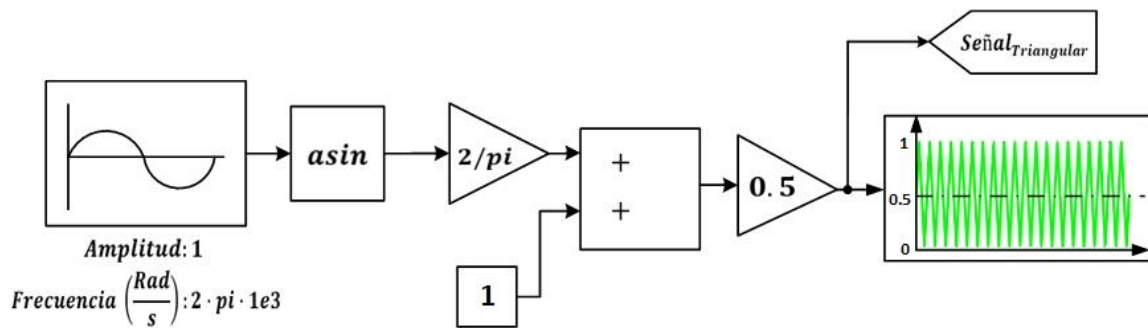


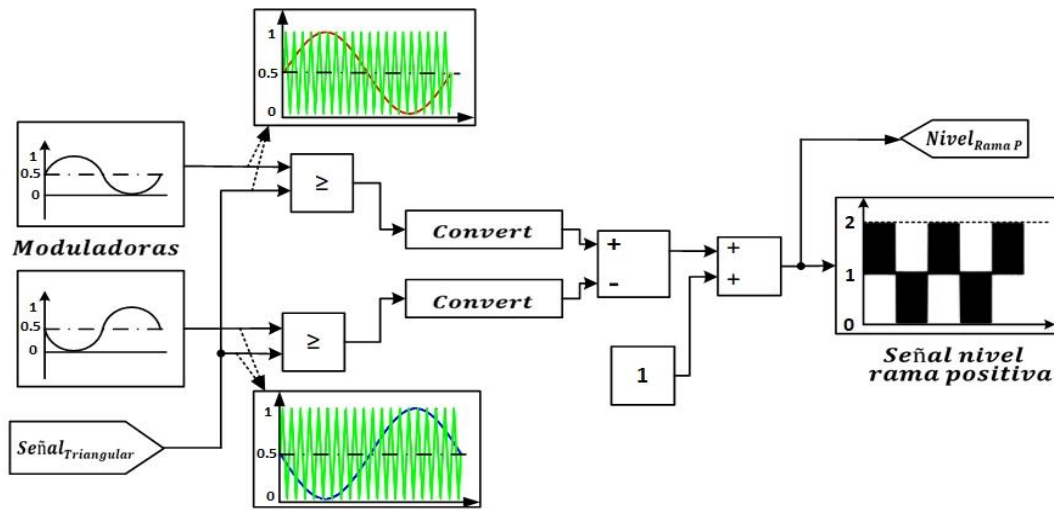
Fig. 2-3.1 Esquema de señal triangular.

Como se mencionó anteriormente, es necesario para este caso comenzar con generar la señal portadora la cual tendrá una frecuencia de 1 [kHz] (f_{tri}), esta señal portadora la cual será utilizada en conjunto con las moduladoras respectivas de cada caso para generar la señales nivel tanto de la rama positiva como negativa del M^2C monofasico.

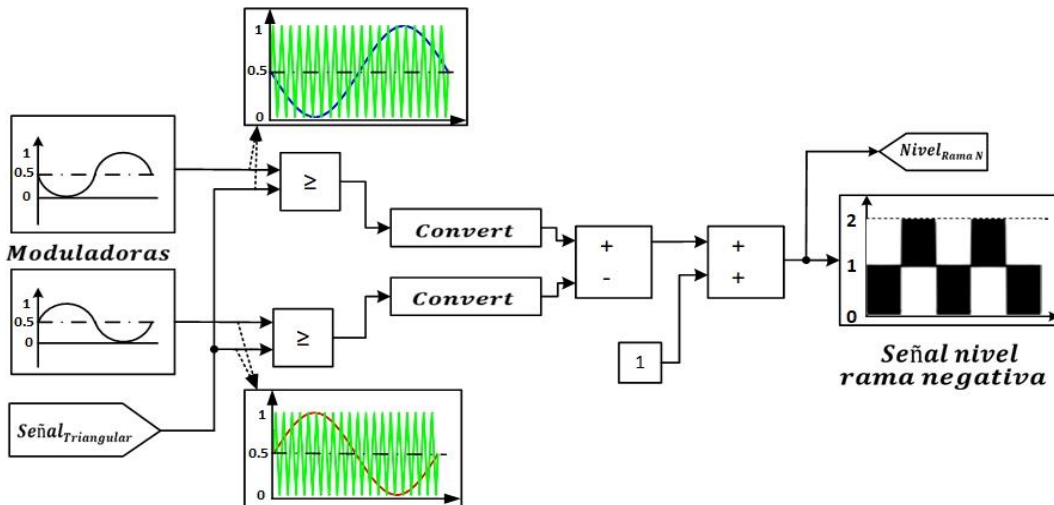
La señal triangular (Portadora) de la Fig. 2-3.1, de 1 [kHz] tiene una amplitud que varía entre 0 y 1, la frecuencia de dicha señal está en razón 20:1 respecto a las moduladoras que se presentan en la etapa de generación de señales PWM.

3.2.2 Generación de señales nivel PWM

El algoritmo necesario para realizar el balance de los condensadores requiere de una señal nivel PWM tanto para la rama positiva como negativa, la cual contiene tres niveles (0, 1 y 2). Estos niveles permiten en el algoritmo de balance utilizar dichas variables $Nivel_{Rama P} = 0$, $Nivel_{Rama P} = 1$ o $Nivel_{Rama P} = 2$ para la rama positiva y $Nivel_{Rama N} = 0$, $Nivel_{Rama N} = 1$ o $Nivel_{Rama N} = 2$ para la rama negativa, con el fin de poder diferenciar un nivel de otro.



(a)



(b)

Fig. 3-3.1 Generación señales nivel PWM para el M^2C monofásico.
(a) Rama positiva, (b) Rama negativa.

En la Fig. 3-3.1 (a) se exhibe el modelo del esquema realizado en Matlab-Simulink para la construcción de la señal nivel de la rama positiva, el cual se compone en una primera etapa por dos señales sinusoidales (moduladoras), la primera de amplitud 0.5, offset 0.5 y frecuencia de 50 [Hz], la segunda conserva los parámetros anteriores, pero con una fase de π [rad], por lo tanto, se cuenta con dos moduladoras en contra fase. Posteriormente se comparan con la señal triangular donde se obtiene a la salida de los bloque de comparación mayor o igual una señal pulsante que varía entre 0 y 1 para ambos casos, luego de esto es necesario ingresarlas por un bloque **“Convert”** el cual convierte una señal física a una señal de salida de Simulink. Una vez transcurrido este punto a la forma de onda superior se le resta la inferior obteniendo una señal PWM de amplitud que varía entre 1 y -1 centrada en 0, por lo tanto, es necesario desplazarla, lo cual se logra sumándole un 1 al resultado actual de señal PWM. Finalmente, como resultado de este procedimiento se obtiene como se aprecia en la figura señalada una señal PWM con tres niveles (0, 1 y 2) la cual será de utilidad para generar los pulsos de disparo de la rama positiva.

La señal nivel de la rama negativa se genera de forma similar al caso anterior, la diferencia está que en este caso la primera moduladora tiene una fase de π [rad], la segunda sinusoidal fase de 0 [rad], de igual manera se tiene dos moduladoras de amplitud 0.5, offset 0.5 y frecuencia de 50 [Hz] en contra fase como se muestra en la Fig. 3-3.1 (b). posteriormente se sigue el mismo procedimiento presentado en el caso anterior, obteniendo como resultado de esto una señal nivel PWM con tres niveles en contra fase respecto de la rama positiva.

Finalmente, una vez obtenida las señales nivel de ambas ramas, se procederá a la siguiente etapa la cual consta de la generación del esquema de balance, el cual requiere del sensado de las mediciones de voltaje de condensadores, corrientes de cada rama respectiva y las señales nivel generadas en esta etapa. El procedimiento de dicho proceso se presenta a continuación.

3.2.3 Generación de algoritmo de balance de los condensadores del M^2C monofásico

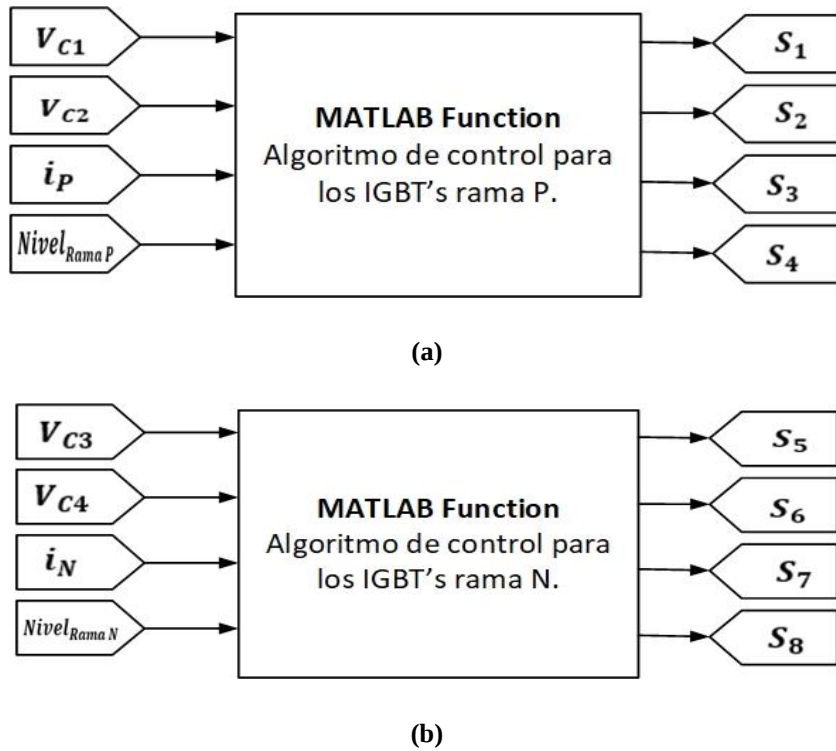


Fig. 4-3.1 Esquema de balance de condensadores del M^2C monofásico.
(a) Rama positiva, (b) Rama negativa.

La estrategia de balance del M^2C monofásico mostrado en la Fig. 1-3.1, requiere de un control para la rama positiva, siendo necesario el sensado de los valores de voltaje de los condensadores V_{C1} y V_{C2} , corriente i_p y la señal de referencia $Nivel_{Rama P}$, estos parámetros ingresan al bloque de **MATLAB function** y mediante un algoritmo interno se genera cada nivel de voltaje de salida respectivo, para luego obtener los pulsos de disparo S_1, S_2, S_3 y S_4 . el esquema propuesto se muestra en la Fig. 4-3.1 (a).

Para el balance de los condensadores de la rama negativa es similar al caso anterior con la salvedad que requiere del sensado de valores de voltajes de los condensadores V_{C3} y V_{C4} , corriente i_n y la señal de referencia $Nivel_{Rama N}$, de igual forma estos parámetros ingresan a un bloque de **MATLAB function** en donde se genera cada nivel de voltaje, para luego obtener los pulsos de disparo S_5, S_6, S_7 y S_8 . Su esquema respectivo se muestra en la Fig. 4-3.1 (b).

3.3. Simulación del M^2C monofásico basado en la celda SINAMICS

La simulación propuesta consiste en el modelo presentado en la Fig. 1-3.1, el cual se implementará en Matlab-Simulink con el propósito de analizar los resultados que se obtengan de dicho proceso en términos de voltaje y corriente del M^2C , con el esquema propuesto en la Fig. 4-3.1. Los parámetros utilizados en la simulación se describen a continuación.

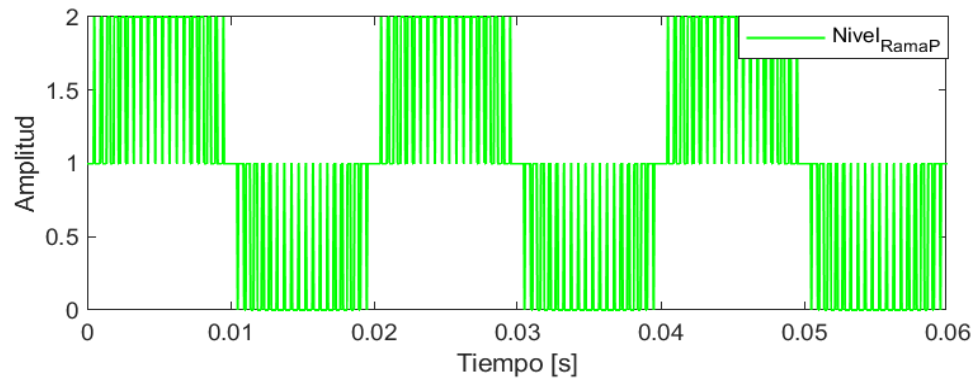
Tabla 1-3.1 Valores numéricos para simulación del M^2C monofásico.

Parámetros	Valor	
Frecuencia	50	Hz
f_{tri}	1000	Hz
C_1, C_2, C_3, C_4 y C_r (Condensadores)	1000	μF
R_r (Resistencia parasita)	0.01	Ω
L_C (Inductancia de carga)	15	mH
R_c (Resistencia de carga)	100	Ω
L_P y L_N (Inductancia de rama)	5	mH
V_{dc} (Voltaje DC)	100	V
Tiempo de muestreo	30	μs

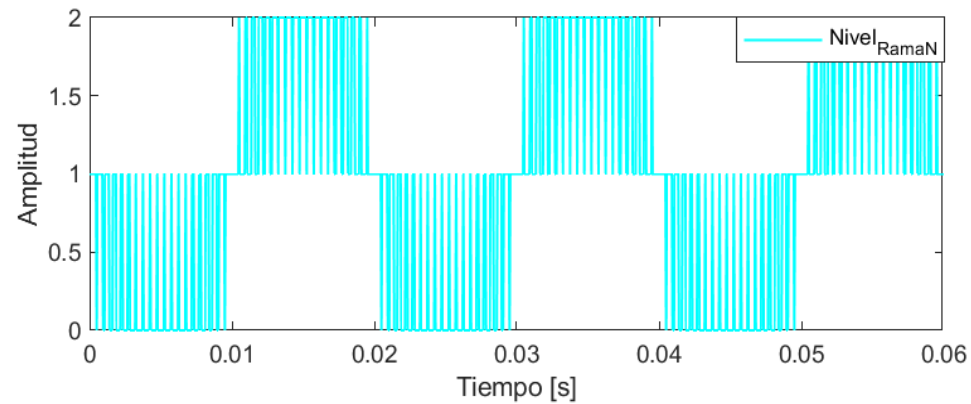
Considerando los valores descritos en la Tabla 1-3.1, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

3.3.1 Resultados de la simulación del M^2C monofásico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelo M^2C monofásico mediante simulación, considerando la topología presentada en la Fig. 1-3.1. Se comienza con las formas de onda de las señales nivel y posteriormente con las de voltaje y corriente de dicho modelo.



(a)

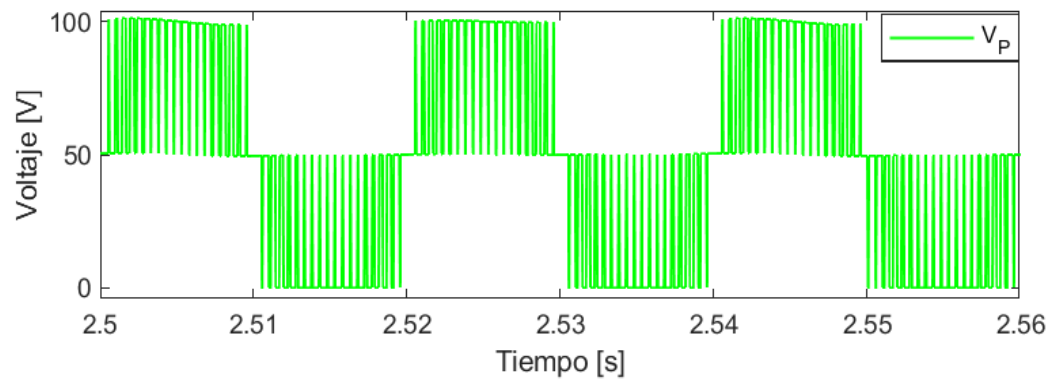


(b)

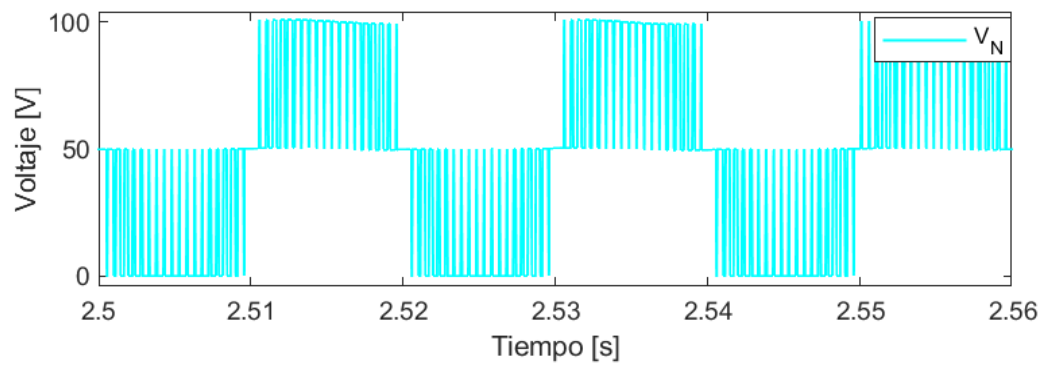
Fig. 5-3.1 Gráficas de señales nivel implementadas en Simulink.**(a)** Rama positiva **(b)** Rama negativa.

Se presenta en la Fig. 5-3.1 (a) y (b), las señales de referencia nivel PWM la cual contiene los tres niveles necesarios para realizar el algoritmo de balance de la rama positiva y negativa, esta señal escalonada permite diferenciar entre un nivel de otro, con solo llamar a la variable y mediante los estados definidos en las tablas 2-2.1 y 3-2.1 se generan las conmutaciones de los switch para cada nivel de voltaje respectivo.

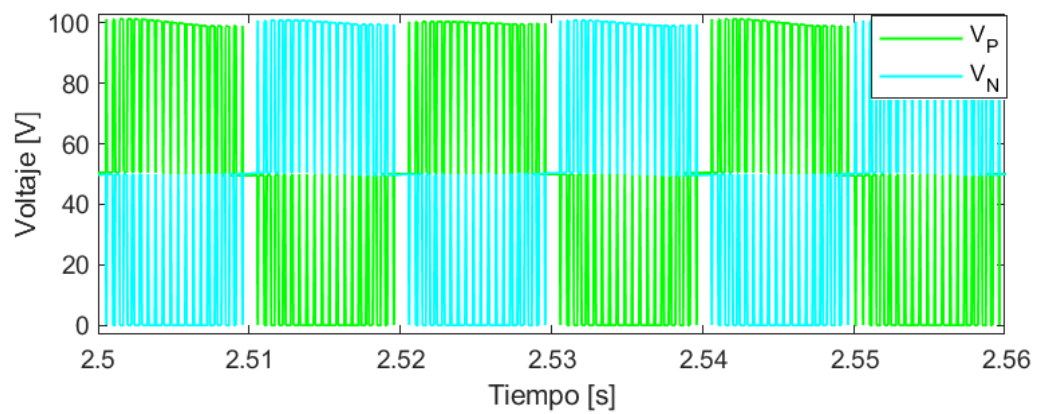
Formas de onda de Voltaje V_P y V_N :



(a)



(b)



(c)

Fig. 6-3.1 Gráficas de voltaje del M^2C monofásico implementado en Simulink.

(a) Rama positiva, (b) Rama negativa, (c) Voltaje rama P y N.

Se observa de la Fig. 6-3.1 (a) la forma de onda del voltaje PWM de la rama positiva, la cual está formada por tres niveles de voltaje 0, 50 y 100 [V] respectivamente, cada nivel se generó mediante el algoritmo descrito anteriormente el cual toma como referencia la señal $Nivel_{Rama\ P}$, corriente de rama positiva (i_p) y el censado de los valores de los condensadores del módulo (V_{dc1} y V_{dc2}).

El voltaje en la rama negativa se genera de forma similar al caso anterior, pero con la excepción de que el algoritmo de la rama negativa requiere la referencia $Nivel_{Rama\ N}$, corriente de rama negativa (i_n) y el sensado de los valores de los condensadores del módulo respectivo (V_{dc3} y V_{dc4}). Con esto se puede concluir que mediante el esquema propuesto se logra obtener un balance adecuado en los condensadores de ambas ramas, debido a esto es posible lograr un voltaje esperado acorde a los parámetros considerados. Cabe destacar que los resultados fueron obtenidos en estado estacionario.

Forma de onda de Voltaje V_{Carga} :

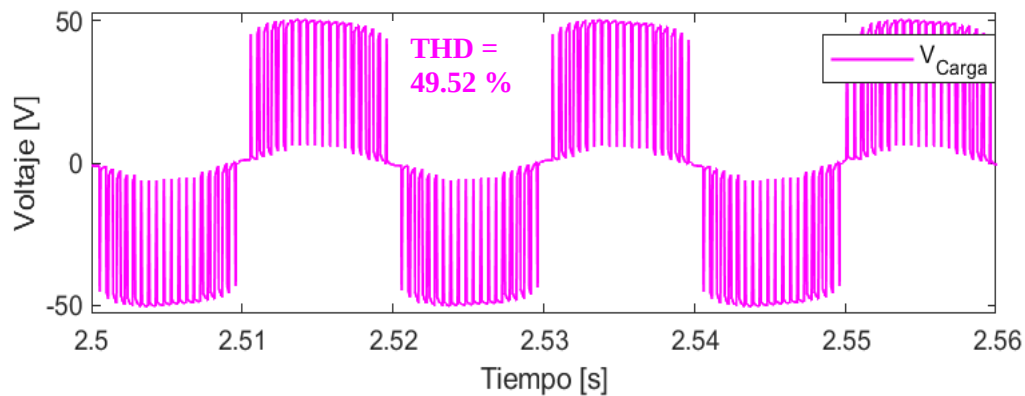


Fig. 7-3.1 Voltaje de carga del M^2C monofásico implementado en Simulink.

En la Fig. 7-3.1 se tiene la medición de voltaje en la carga observando una tendencia PWM, al medir en dicho punto no se ve el offset que se genera en el caso de la rama positiva y/o negativa de los casos anteriores, esta diferencia se elimina en este punto, obteniendo una forma de onda que tiene una amplitud entre -50 y 50 [V] centrada en cero. Con variaciones de voltaje (dv/dt) de 50 [V], lo cual es lo esperado considerando la fuente de voltaje DC de 100 [V] y la cantidad de módulos utilizados. El valor de $THD_v = 49.52\%$ obtenido para el voltaje de carga del M^2C monofásico se debe tener consideración que solo se cuenta con una celda por rama.

Forma de onda de Corriente i_{carga} :

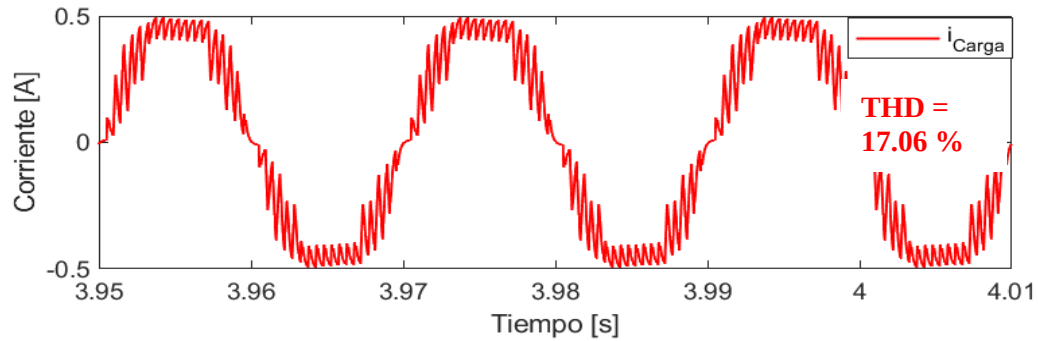


Fig. 8-3.1 Gráfica de corriente de carga del M^2C monofásico implementado en Simulink.

La corriente de carga se presenta en la Fig. 8-3.1, donde se muestran 3 periodos de señal fundamental. Esta corriente posee una amplitud de $0.5 [A]$, donde se observa una forma de onda alterna (AC) con una tendencia sinusoidal notoria, pero con un $THD_i = 17.06 \%$, lo cual es esperable debido a que solo se tiene una celda SINAMICS por rama en dicho sistema y, además, la frecuencia de conmutación establecida para la señal portadora es de $1 [kHz]$. La solución para disminuir el THD_i sería aumentar la frecuencia de la señal portadora, lo que resuelve hasta un límite, ya que aumentarían las pérdidas por conmutación en los IGBT, o aumentar el número de módulos por rama. Si bien la corriente tiene un THD_i significativo, no es un parámetro que se tuviera como objetivo controlar, por ende, no se hizo tanto énfasis en dicho caso.

Forma de onda de balance de condensadores V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} y V_{c4} :

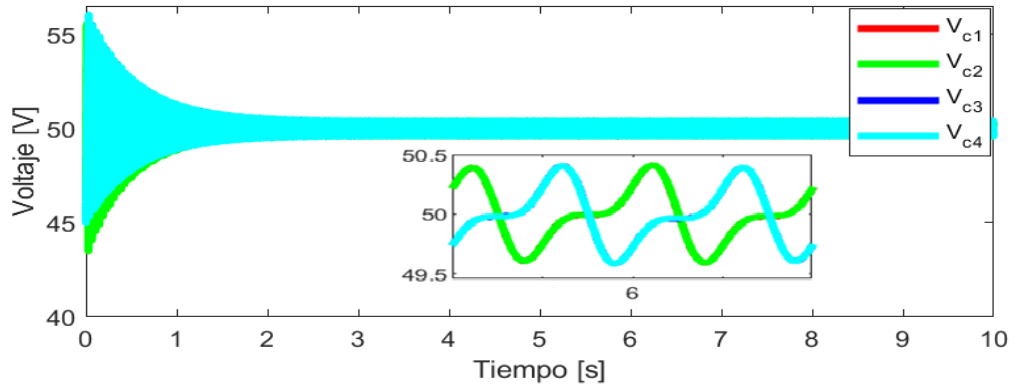


Fig. 9-3.1 Voltaje en los condensadores del M^2C monofásico implementado en Simulink.

Finalmente, el voltaje de los condensadores de la rama positiva y negativa se presentan en la Fig. 9-3.1, con el objetivo de ver el comportamiento de estos durante el tiempo de balance, se observa que se demoran un tiempo de 2[s] aproximadamente en llegar a un balance más estable cercano a los 50 [V] de referencia, esto considerando que cada rama contiene dos condensadores y la fuente de voltaje es de 100 [V], por ende, cada uno puede almacenar 50 [V] DC. Se logra apreciar de la miniatura que el voltaje se logra estabilizar en los 50 [V] pero con un cierto ripple de 0.5 [V] de amplitud.

Cabe destacar que al iniciar la simulación el voltaje inicial en los condensadores presentes del M^2C es 0 [V] y posteriormente comienza a aumentar hasta llegar a los 100 [V] de amplitud Peak en un lapso muy corto de tiempo, transcurrido el tiempo comienza a estabilizarse en los 50 [V], no antes de un lapso mayor a los 1.5 [s]. Si bien los condensadores se encuentran fabricados para soportar estos Peak iniciales de voltaje altos lo esperable es poder reducir dicho caso.

Por lo tanto, se opta por iniciar los condensadores con un voltaje distinto de 0 [V] para este caso se opta por 45 [V] con el fin de que al activar la simulación el voltaje Peak inicial no sea tan alto (Siendo el objetivo de esto reducir la amplitud Peak), Se muestra en la Fig. 9-3.1 el resultado de dicho procedimiento, donde el voltaje inicial comienza en aproximadamente 45 [V] y llega hasta los 55 [V] de amplitud Peak, haciendo que esta diferencia sea significativamente menor en comparación con el caso presentado anteriormente.

3.4. Discusión

En la presente investigación, se abordó el estudio del M^2C monofásico implementado en Matlab-Simulink, con un enfoque específico en la topología del convertidor y el esquema de balance de los condensadores utilizando celdas SINAMICS. La simulación desarrollada permitió observar y analizar el comportamiento del voltaje y la corriente en las ramas positiva y negativa, así como en la carga conectada al sistema.

Se observó que, al iniciar la simulación el voltaje en los condensadores experimenta un aumento rápido hasta alcanzar un peak de 100 [V], antes de estabilizarse en los 50 [V]. Esta característica, aunque esperable, sugiere la necesidad de iniciar la simulación con un voltaje distinto de 0 [V] en los condensadores para mitigar los peak de voltaje iniciales, lo cual fue validado mediante la modificación de las condiciones iniciales, logrando reducir significativamente la amplitud del peak inicial.

En resumen, los resultados de la simulación confirman la efectividad del esquema de modulación y balance propuesto para el M^2C monofásico, aunque resaltan la necesidad de considerar los parámetros de diseño para optimizar el rendimiento del sistema, especialmente en lo que respecta al balance de voltaje de los condensadores para mantener la estabilidad del sistema.

Capítulo 4. Resultados experimentales

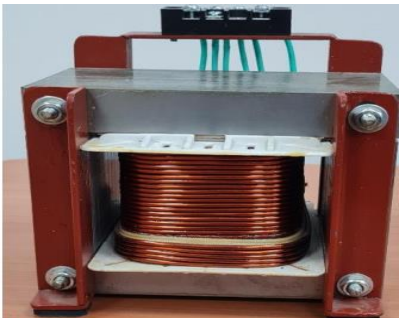
4.1. Introducción

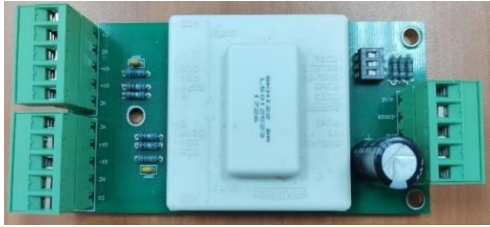
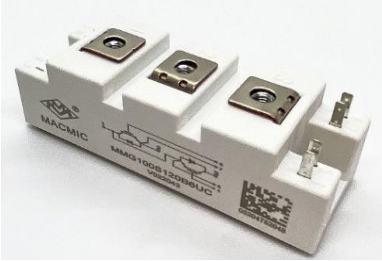
En este capítulo del proyecto se abordará la validación experimental de la topología del M^2C monofásico que será desarrollada en el laboratorio LEPA 1, el objetivo es implementar la configuración presentada en la Fig. 1-3.1 haciendo uso de su respectivo esquema de balance de condensadores, cabe destacar una vez mas que es de gran importancia los resultados que se obtengan de estas simulaciones.

4.2. Equipos e instrumentos utilizados

A continuación, se presentan los equipos e instrumentos utilizados en el proceso de implementación experimental de la topología mencionada.

Tabla 1-4.1 Equipos e instrumentos para etapa experimental.

	Resistencia de alambre enrollado tipo: fijo de 100 [Ω].
	Inductancia ajustable entre los rangos de 5, 10 y 15 [mH].

	Modulo Gate Drive para la distribución de los pulsos de disparo hacia los módulos IGBT.
	Módulo de transistor IGBT SEMIKRON de medio puente 34 [mm], 1200 [V] -100 [A], Velocidad de conmutación ultrarrápida.
	Condensador electrolítico marca EPCOS, modelo B43564-A5108-M, 450 [V], de 1000 [μF].
	MicroLabBox para el procesamiento de las señales que serán censadas en Setup del M^2C. Alimentación 220 [V], entradas analógicas 24 canales, salidas analógicas 32 canales, I/O digitales 72 canales.
	Multímetro digital marca FLUKE 87 True RMS.
	Interruptor termomagnético monofásico.

	Fuente de alimentación regenerativa marca KEYSIGHT serie RP7961A, proporciona suministro entre los rangos de 0 500 [V] / 0 ± 20 [A] / 5 [kW].
	Osciloscopio de banco Keysight Technologies MSOX3024T, de 4 canales, 200 [MHz], pantalla de 8.5 pulgadas, interfaz USB.
	Sonda de corriente AC/DC modelo SL261 con conexión BNC y cable coaxial de 6.5', rango de 100 [mA] a 100 [A], salida 10 [A] - 100 [mV/A], 100 [A] – 10 [mV/A].
	Sonda diferencial marca Pintek DC-25 [mHz] Voltaje Máximo 1400 [Vp-p] X20, X50, X200.
	Fuente de alimentación DC, 0-20 [V], uso como una fuente de voltaje constante con limitación de corriente o como una fuente de corriente constante con limitación de voltaje.

Con el fin de poder comprender la conexión interna del módulo IGBT utilizado en el laboratorio LEPA 1 se presenta el siguiente esquema el cual ilustra dicha configuración.

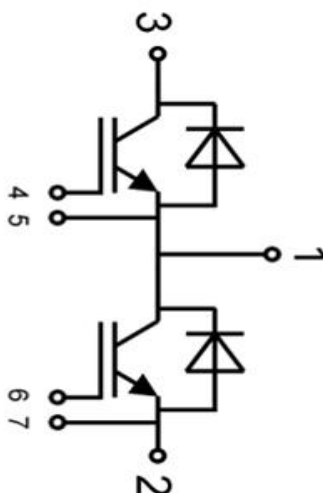


Fig. 1-4.1 Topología del módulo IGBT para simulación experimental.

Se presenta en la Fig. 1-4.1 el esquema del IGBT encapsulado modelo SEMIKRON SKM100GB12T4 considerado para la etapa experimental donde se observan ambos Switch, los terminales 5 y 4 controlan el interruptor “ S_1 ”, mientras que 6 y 7 controlan “ S_2 ”. Cabe destacar que los terminales 3, 2 y 1 corresponden a los puntos de conexión externos en los cuales se realiza el cableado entre los módulos que se requiera, se considera esta configuración para la realizar la conexión con el siguiente módulo y así formar la celda SINAMICS. La conexión completa se presenta en la Fig. 4-4.1.

Tabla 2-4.1 Tabla de conexiones.

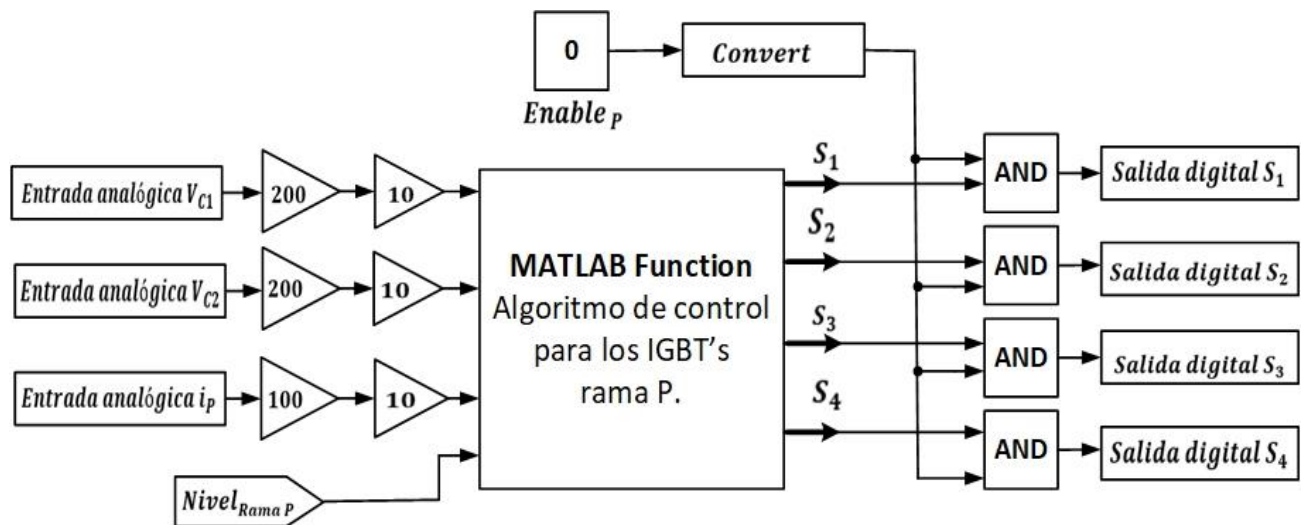
Terminal	Conexión
3	Terminal superior
2	Terminal inferior
1	Terminal medio
5 y 4	Señal de control para switch 1
6 y 7	Señal de control para switch 2

4.3. Simulación experimental del M^2C Monofásico

Se presenta en esta sección los resultados experimentales obtenidos del M^2C monofásico haciendo uso del modelo presentado en la Fig. 1-3.1, en esta etapa experimental se cuenta con un esquema de balance independiente tanto en la rama positiva como negativa, los cuales se presentan en la Fig. 2-4.1 (a) y (b).

4.3.1 Generación de algoritmo de balance de los condensadores etapa experimental

En esta sección se presenta el esquema de balance para los condensadores de la rama positiva y negativa del M^2C monofásico para la etapa de simulación experimental, donde se muestra la configuración para la medición de las variables requeridas.



(a)

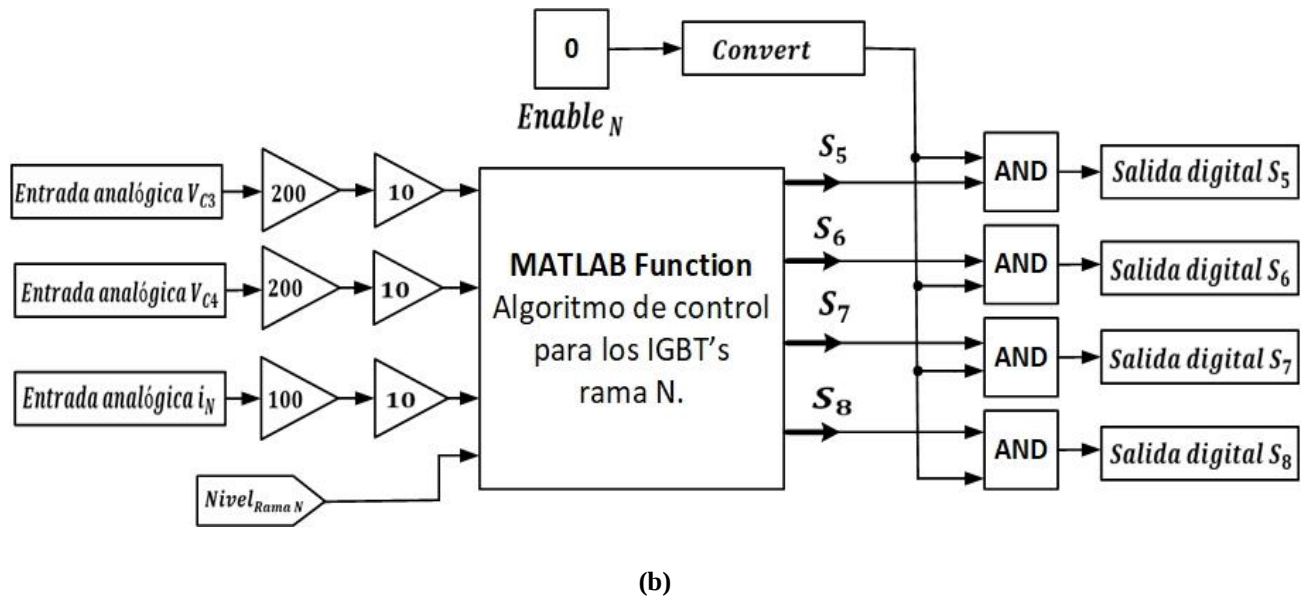


Fig. 2-4.1 Esquema de balance.
(a) Rama positiva, **(b)** Rama negativa.

Las señales de entrada censadas son multiplicadas por la ganancia respectiva a la cual se ajusta el instrumento de medición correspondiente para cada caso, la ganancia del instrumento es el factor de escala que determina cómo la señal medida se traduce a la señal de salida. Para el sensor de medición de diferencia de potencial se mide en el rango de $\times 200$, para el de corriente en el rango de 10 mV/A , y además se debe considerar la ganancia propia del equipo **Dspace**. Estas ganancias permiten mantener la relación que hay al momento de procesar las formas de onda y así obtener el valor acorde a lo esperado.

Cada función de MATLAB toma como entrada las señales de voltaje de los condensadores, la corriente respectiva de cada rama y las referencias nivel. A través de estos parámetros, se implementa un algoritmo que controla el encendido y apagado de los IGBT para cada nivel de voltaje respectivo. Como salida, se obtienen los pulsos de disparo de cada rama los cuales se distribuyen hacia las salidas digitales de la Dspace y posteriormente a los Gate Drives para el control de los módulos del M^2C .

Es necesario generar dos bloques **Enable**, los cuales se mantiene en '0' (simulación no ejecutada) en el modelo realizado en Simulink. Posteriormente, estas señales ingresan a un bloque AND, el cual la compara con la señal de los estados que provienen de los bloques de **MATLAB Function**. Por lo tanto, el control de encendido y apagado de los disparos se realiza desde la interfaz

del **ControlDesk** para cada rama, en la cual se agregan las variables llamadas **Enable_P** y **Enable_N** como **Numeric Input**, lo que permitirá ingresar una entrada numérica como (0 o 1) para activar o desactivar dicha simulación que ya fue implementada, en conclusión, para que la simulación se ejecute ambos deben estar en 1.

Conexión entre Gate Drives y módulos IGBT del M^2C de forma experimental, donde se ilustra la configuración que se implementó para los respectivos dispositivos.

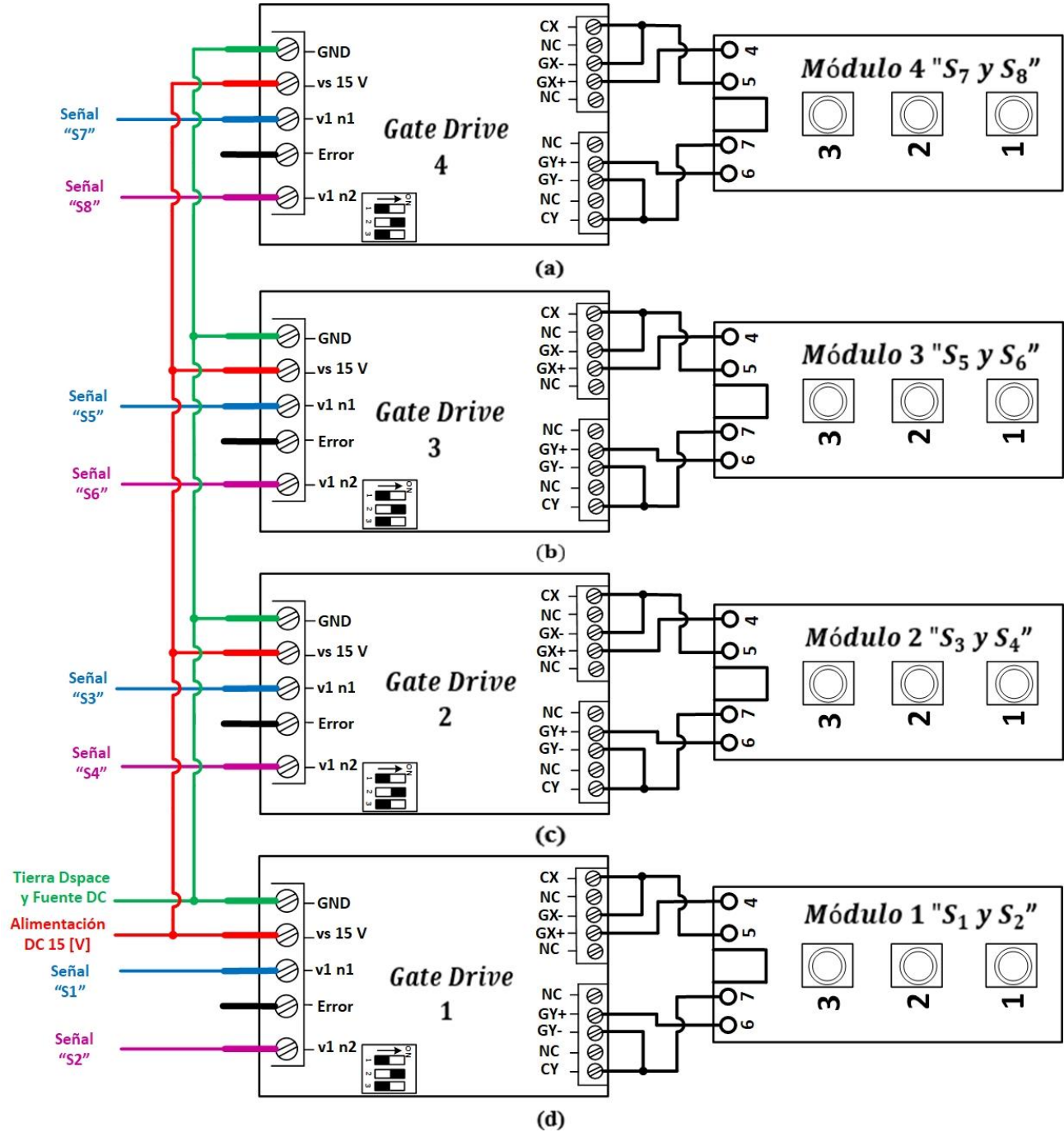


Fig. 3-4.1 Conexión entre Gate Drives y módulos IGBT.

(a) Drive 4 y Módulo 4, (b) Driver 3 y Módulo 3, (c) Driver 2 y Módulo 2, (d) Driver 1 y Módulo 1.

Para la conexión en la entrada de los Gate Drive se debe conectar la tierra de la Dspace y de la fuente DC (líneas verde) en este caso al Drive 1 y posteriormente se puentea a los demás dispositivos, la alimentación DC es de 15 [V] (líneas rojas) y va hacia todos los Drives como se muestra en la Fig. 3-4.1. Finalmente, se conectan las entradas respectivas de los disparos de cada Switch (líneas azules y moradas) provenientes de las salidas digitales de la Dspace.

Los pulsos de disparo son enviados a los Gate Drives como se muestra en la Fig. 3-4.1, para el primer caso S_1 y S_2 para el Drive 1 a las entradas $v1\ n1$ y $v1\ n2$, posterior a esto los disparos de S_1 ingresan por los terminales 4 y 5 del módulo 1, cabe destacar que es necesario puentear CX y $-GX$ que ingresan al terminal 5 y la salida $GY +$ va al 4 directamente. Para el caso de S_2 ingresa por 6 y 7 del mismo módulo, donde $GY -$ y CY se puentean para ingresar al terminal que va hacia 7, y por último $GY +$ va hacia el 6. De esta forma se cuenta con el control de los Switch S_1 y S_2 del primer módulo.

Para los Drive 2, 3 y 4 siguen la misma lógica de conexión presentada anteriormente para los terminales de salida de estos, luego S_3 y S_4 ingresan al módulo 2, S_5 y S_6 al módulo 3 y, finalmente, S_7 y S_8 al módulo 4 respectivamente. Con esto se obtiene la distribución de los pulsos de disparos de cada Switch del M^2C . Cabe destacar que es necesario tener en cuenta el tiempo muerto que corresponde al Δt de tiempo que hay entre el encendido y apagado de un switch y otro del mismo modulo, este corresponde a 3.12 [μs] aproximadamente, el cual se ajusta mediante la configuración que se muestra en los tres botones sobre las placas de los Gate Driver (1 en OFF, 2 en ON y 3 en OFF).

La conexión entre los módulos IGBT de la rama positiva y negativa del M^2C monofásico de experimental con sus respectivos condensadores y los demás dispositivos se muestra en la figura 4-4.1, esto con el propósito de comprender las conexiones que se realizaron en dicho modelo.

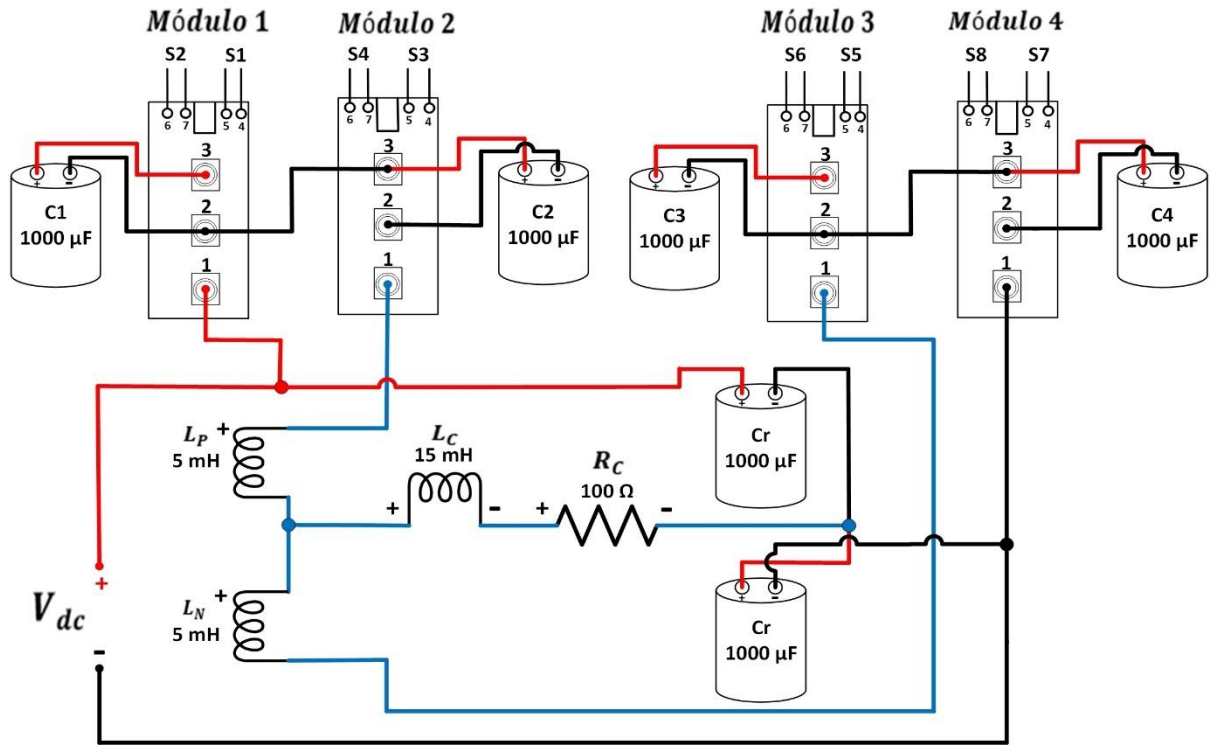


Fig. 4-4.1 Conexión entre módulos IGBT y demás dispositivos.

En la Fig. 4-4.1, se muestra el cableado entre los módulos IGBT de la rama positiva y negativa con sus respectivos dispositivos: condensadores, inductancias y resistencia, como se observa en la figura mencionada, cabe destacar que los terminales 1 de los módulos 1 y 4 son los que se conectan a la fuente de alimentación DC (Cable rojo al positivo de la fuente y negro al negativo). Entre el terminal 1 de los módulos 2 y 3, se conectan ambas ramas mediante una inductancia de valor 5 [mH]. Posteriormente, desde el punto medio de ambas, se conecta una carga RL de parámetros 15 [mH] y 100 [Ω] respectivamente.

De cada módulo, su terminal 3 se conecta el positivo de un condensador de valor 1000 [μF] y el terminal 2 se conecta al negativo. Los módulos de una misma rama se unen mediante los terminales 2 y 3 como se muestra en dicha figura. Es importante destacar que, el sensado de corrientes y voltajes del setup del M^2C se hace mediante el uso de los instrumentos descritos en la Tabla 1-4.1.

Modelo del esquema implementado de forma experimental del M^2C desde una perspectiva general.

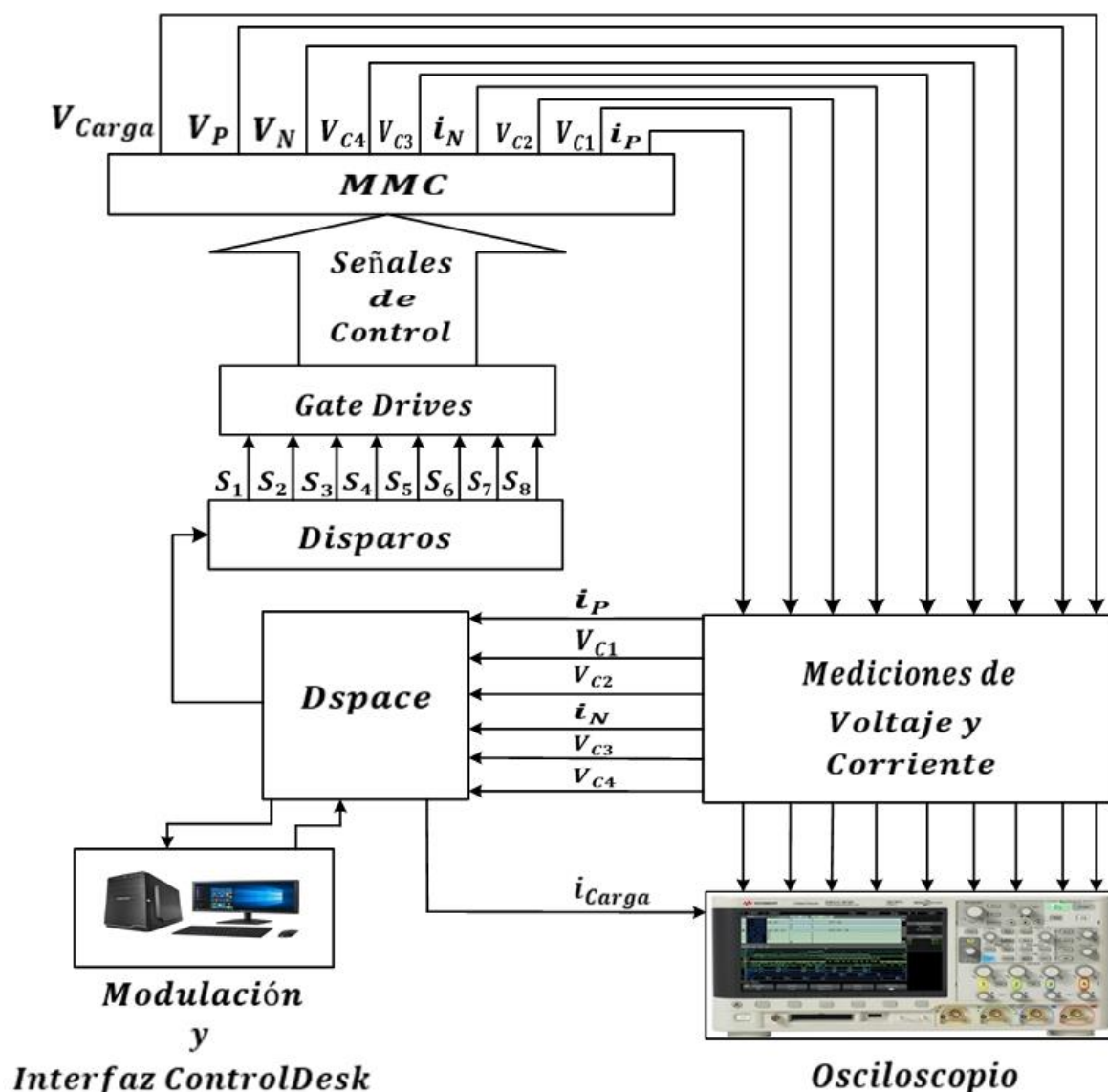


Fig. 5-4.1 Esquema general implementado.

Con el fin de poder comprender el esquema del M^2C implementado de forma experimental en el laboratorio Lepa 1, se presenta la Fig. 5-4.1 en la cual se ilustra desde una perspectiva general el Setup montado desde la etapa de modulación hasta la obtención de las formas de onda mediante el osciloscopio, en el cual se destaca la importancia del sensado de variables de voltaje y corriente para la construcción de la etapa de balance de los condensadores.

4.3.2 Cálculo de corriente de carga

Para el cálculo de la corriente de carga se obtiene mediante un LCK en el nodo donde se conecta la carga RL con la rama positiva y negativa del modelo del M^2C , el cual se presentó en la Fig. 1-3.1, como se cuenta con el sensado de la corriente de la rama positiva y negativa solo basta con realizar el procedimiento que se muestra a continuación.

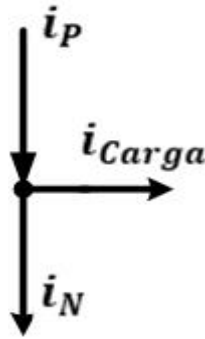


Fig. 6-4.1 Esquema LCK para cálculo de corriente de carga.

Se tiene que la sumatoria de corrientes que ingresan al nodo es igual a las que salen de este, como se muestra en la Fig. 6-4.1, por lo tanto, es posible obtener la corriente de carga mediante la relación que hay entre estas variables. Con este procedimiento se ahorra en la utilización de un sensor de corriente.

$$\sum i_{Entran} = \sum i_{Salen} \quad (1-4.1)$$

Se procede al despeje de la variables de interés, para este caso la corriente de carga como se muestra en la ecuación (3-4.1), lo cual es posible ya que con anterioridad se cuanta con el sensado de las corrientes i_P e i_N , finalmente se envía hacia la Dspace y posteriormente al osciloscopio para su procesamiento.

$$i_P = i_{Caraga} + i_N \quad (2-4.1)$$

$$i_{Carga} = i_P - i_N \quad (3-4.1)$$

4.3.3 Setup del M^2C monofásico realizado en LEPA 1

En la Fig. 7-4.1 se muestra el Setup del M^2C monofásico, en el cual se destacan los equipos e instrumentos utilizados para la validación de los resultados de forma experimental.

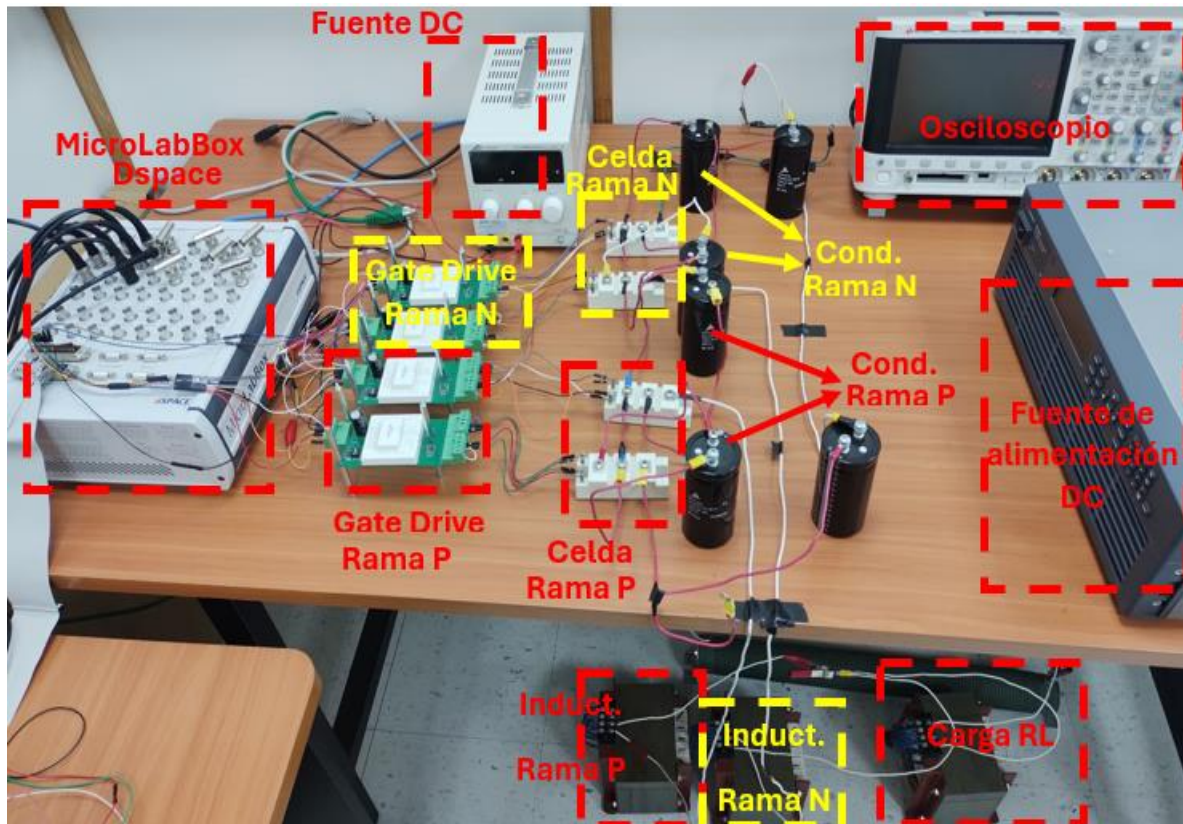


Fig. 7-4.1 Setup del M^2C monofásico realizado en LEPA 1.

Se presentan, a continuación, las formas de onda obtenidas del modelo experimental del M^2C monofásico las cuales fueron procesadas directamente desde el osciloscopio para dos casos de prueba, la primera: la fuente de alimentación se ajusta en 50 [V] y la corriente se satura en ± 0.5 [A], la segunda: es para 100 [V] y una corriente en ± 1.5 [A].

4.3.4 Resultados del M^2C monofásico experimental

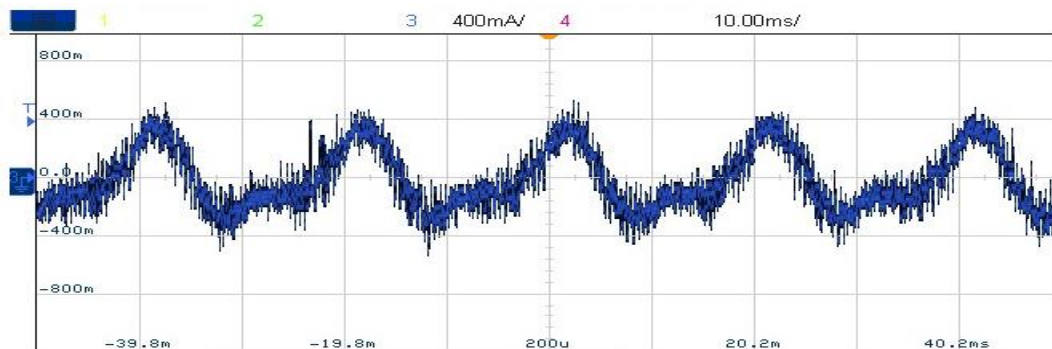
Los parámetros considerados para el setup de la etapa de simulación experimental se presentan en la Tabla 2-4.1 de a continuación.

Tabla 2-4.1 Parámetros para etapa experimental.

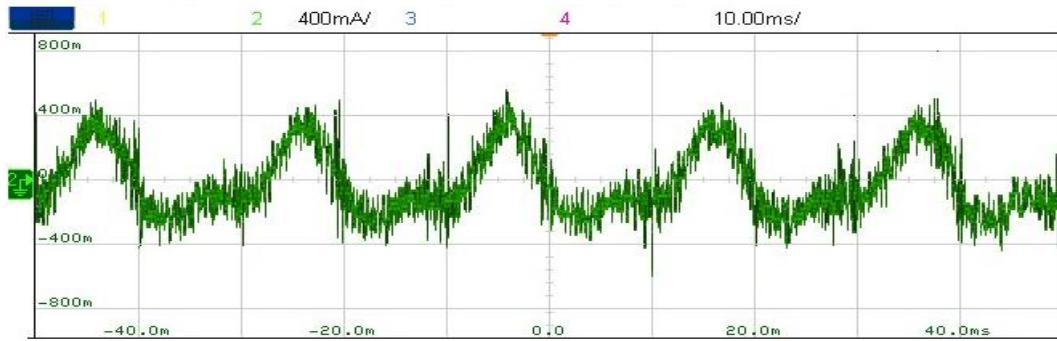
Parámetros	Valor	
Frecuencia	50	Hz
f_{tri}	1000	Hz
C_1, C_2, C_3, C_4 y C_r (Condensadores)	1000	μF
L_C (Inductancia de carga)	15	mH
R_C (Resistencia de carga)	100	Ω
L_P y L_N (Inductancia de rama)	5	mH
Voltaje de alimentación DC	50 y 100	V , ± 0.5 y ± 1.5 A
Tiempo de muestreo	30	μs
Tiempo muerto (Gate Drives)	3.12	μs
Alimentación DC (Gate Drives)	15	V

Prueba 1: Fuente de alimentación en 50 [V] y ± 0.5 [A]

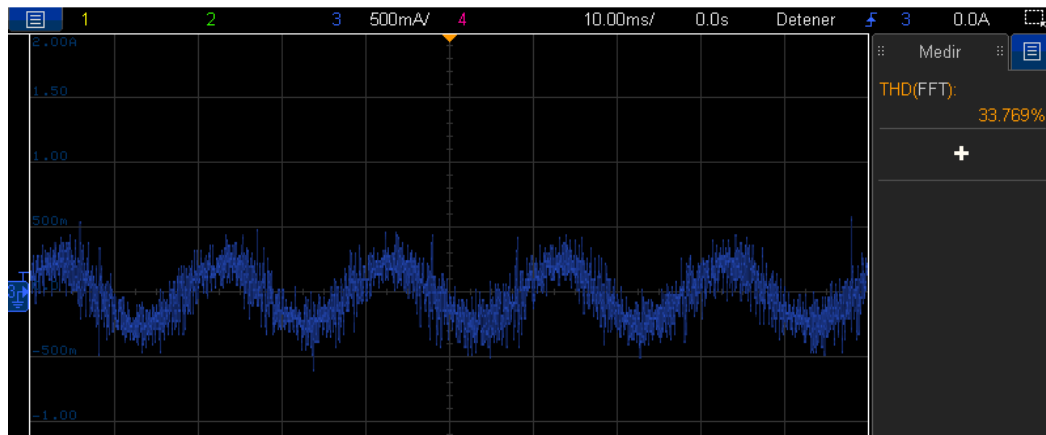
Formas de onda de corriente i_P , i_N y i_{Carga} :



(a)



(b)



(c)

Fig. 8-4.1 Corrientes del M^2C prueba 1.
 (b) Rama positiva, (b) Rama negativa, (c) carga.

Al realizar la resta y el procesamiento de las señales dentro de la Dspace se está a un frecuencia impuesta por esta, cuando se censa directamente con un equipo de medición en el Setup se está usando la resolución del osciloscopio la cual es muchísimo más alta, esto difiere es que una tiene todas las perturbaciones. Al medir directamente se obtiene una mejor resolución, y la otra ya tiene baja resolución y al hacer una resta este resultado va a estar claramente más alejado de lo que se obtendría si se mide directamente, lo cual se ve reflejado al observar dicha señal una vez enviada de la Dspace hacia el osciloscopio.

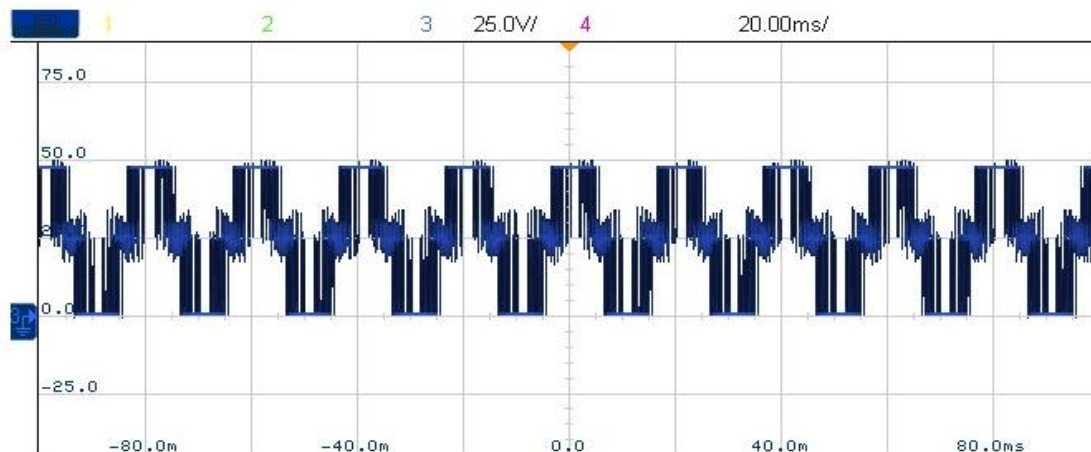
Las imágenes proporcionadas en la Fig. 8-4.1 (a) y (b), muestran las formas de onda de corriente de la ramas positiva (i_p) y negativa (i_N) del M^2C monofásico, capturadas con el osciloscopio. La frecuencia de las señales es de 50 [Hz], deducida del periodo de aproximadamente 20 [ms] por ciclo ($1/20 [ms] = 50 [Hz]$). La escala de tiempo está configurada a 10.00 [ms/div] en ambos

casos, permitiendo una visualización detallada de varios ciclos de las señales de corriente. La escala en el eje “Y” está configurada a $400 [mA/div]$ para ambas señales mostrando amplitudes Peak to Peak de aproximadamente $800 [mA]$.

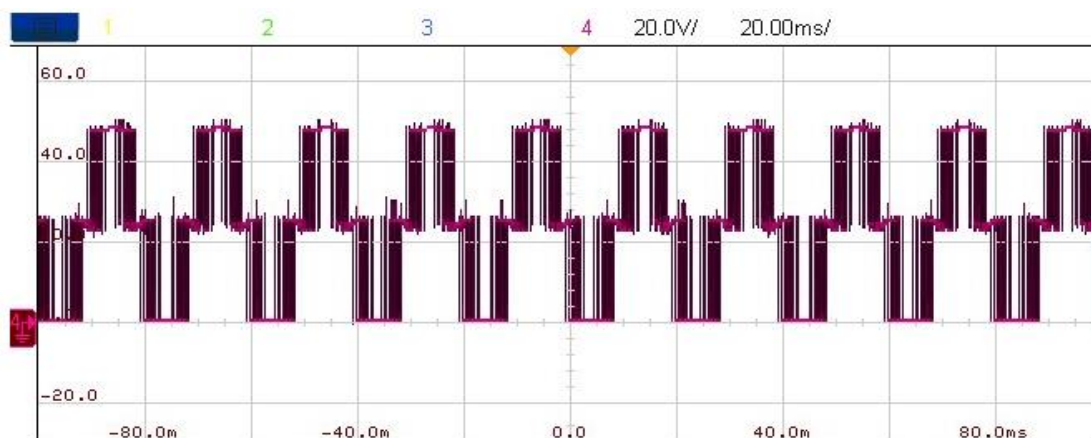
Cabe destacar que el osciloscopio se ajusta en el modo de adquisición de Alta Resolución mediante el botón “**Acquire**” con el fin de obtener imágenes con la mejor calidad, se observa una presencia de ruido en las formas de onda esto debido a que las mediciones se toman en tiempo real con equipos los cuales no son ideales, además se debe considerar los dispositivos conectados que conforman el M^2C pueden aportar con ciertas perturbaciones al momento de las mediciones.

La forma de onda mostrada en la Fig. 8-4.1 (c), corresponde a la corriente en la carga del M^2C . La señal presenta una forma sinusoidal característica indicando que el convertidor está funcionando correctamente gracias al esquema de balance propuesto al generar una corriente alterna (AC), pero con un ruido súper puesto en dicha forma de onda, lo cual puede ser debido a los equipos utilizados mostrando un THD del 33.769% el cual se obtiene mediante la función **FFT** del osciloscopio. En cuanto a los parámetros de la señal, la frecuencia es de $50 [Hz]$, determinada a partir del periodo de la onda que dura $20 [ms]$, La amplitud es de aproximadamente $400 [mA] = 0.4 [A]$, deducida de la escala vertical del osciloscopio configurada a $500 [mA/div]$, observando una división desde el eje central ($0 [mA]$) hacia los picos superior e inferior.

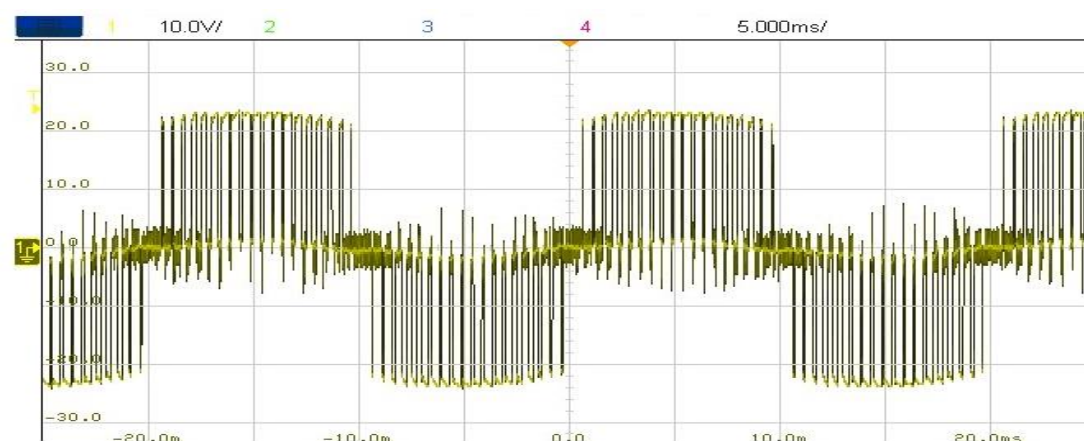
Formas de onda de voltaje V_P , V_N , V_{Carga} y balance de condensadores V_{C1} , V_{C2} , V_{C3} y V_{C4} :



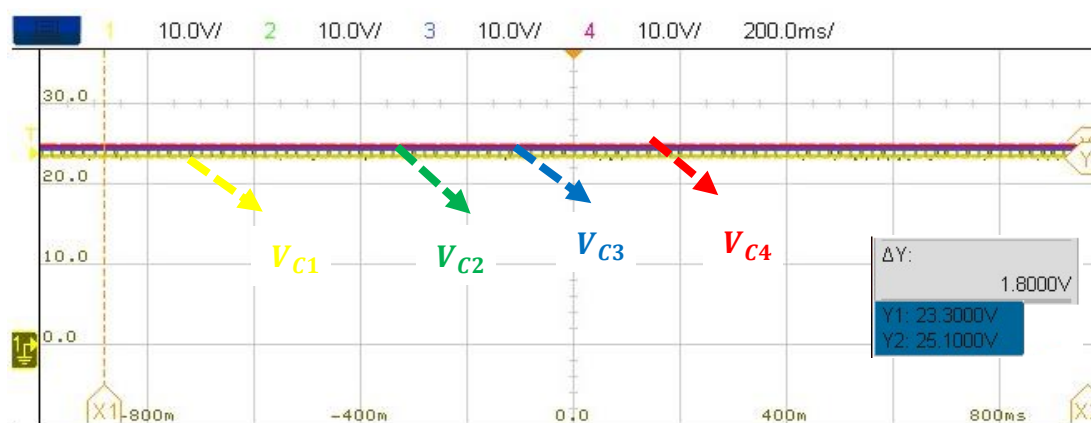
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9-4.1 Voltajes del M^2C prueba 1.
 (a) Rama positiva, (b) Rama negativa, (c) Carga, (d) Balance.

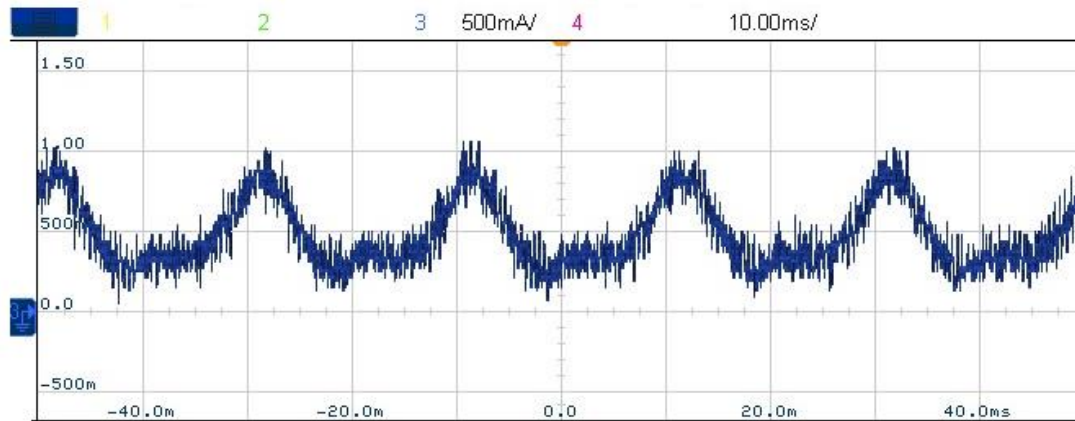
El voltaje de la rama positiva y negativa se muestra en la Fig. 9-4.1 (a) y (b) respectivamente, se observan los 3 niveles de voltaje (0, 25 y 50 [V]) esto gracias a la estrategia de balance, lo cual comprueba que el sistema opera de forma adecuada con los parámetros establecidos.

En la Fig. 9-4.1 (c), se muestra el voltaje de salida del M^2C monofásico esto considerando que el circuito se alimenta con 50 [V] DC, lo que explica que la amplitud de voltaje este cercano a 25 [V] a una escala de 10 [V/div]. la escala de tiempo en el osciloscopio se ajusta a 5 [ms/div], con el fin de poder observar 2 periodos de la forma de onda. La frecuencia de la señal triangular determina la frecuencia de conmutación de los pulsos PWM generados, siendo de 1 [kHz]. Por lo tanto, el número de veces que la señal triangular completa un ciclo en un periodo de tiempo determinado, define la frecuencia a la cual ocurren las transiciones o conmutaciones en la señal PWM de salida, lo cual se ve reflejado en las formas de onda medias.

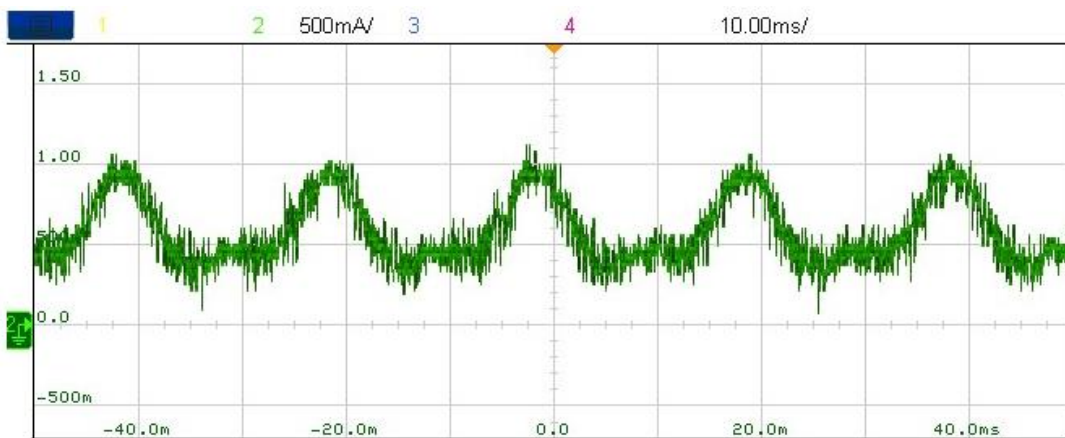
Respecto al voltaje de balance de los condensadores se muestra en la Fig. 9-4.1 (d) a una escala de 10 [V/div], en cual se procedió a ingresar al osciloscopio dichas mediciones una por cada canal, posteriormente se hace uso de los cursores del eje “Y” tomando como límite superior (Y2) y límite inferior (Y1) con el propósito de ver la diferencia de voltaje “ ΔY ” que hay entre dichos condensadores el cual corresponde a 1.8 [V], siendo aceptable considerando el voltaje de alimentación del sistema.

Prueba 2: Fuente de alimentación en 100 [V] y ± 1.5 [A]

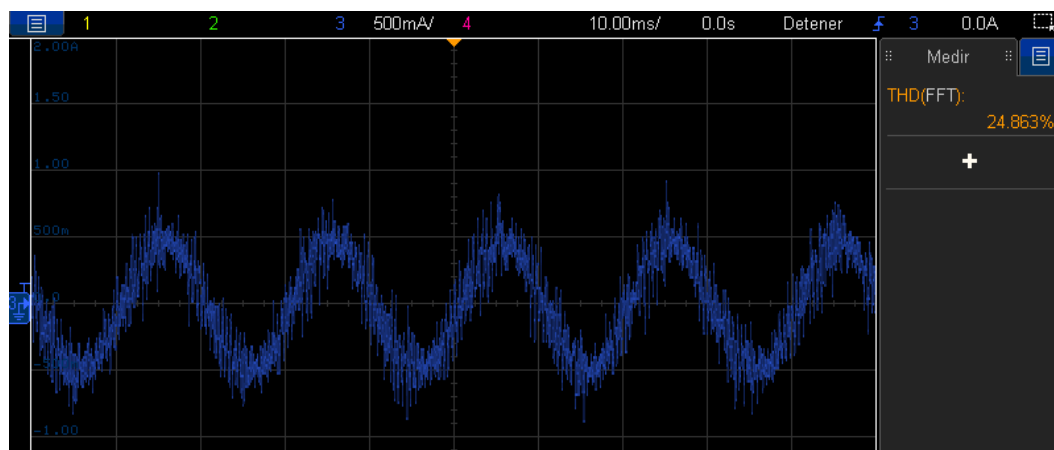
Formas de onda de corriente i_p , i_N y i_{Carga} :



(a)



(b)



(c)

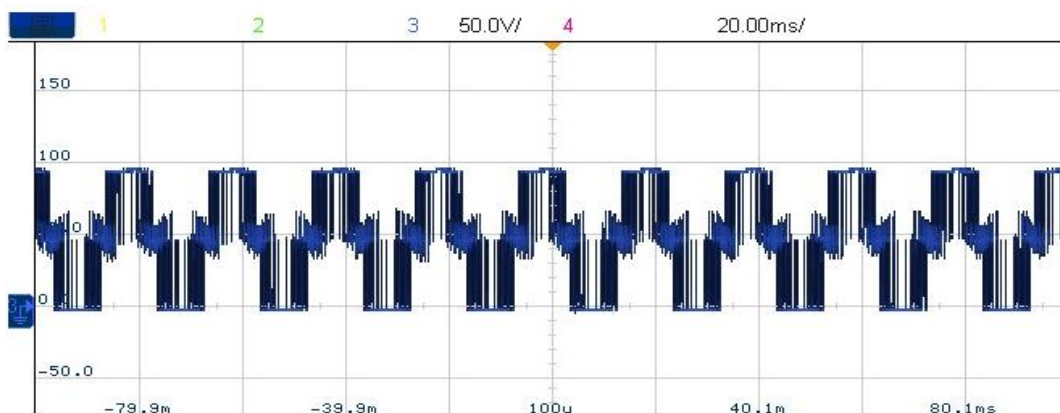
Fig. 10-4.1 Corrientes del M^2C prueba 2.

(a) Rama positiva, (b) Rama negativa, (c) Carga.

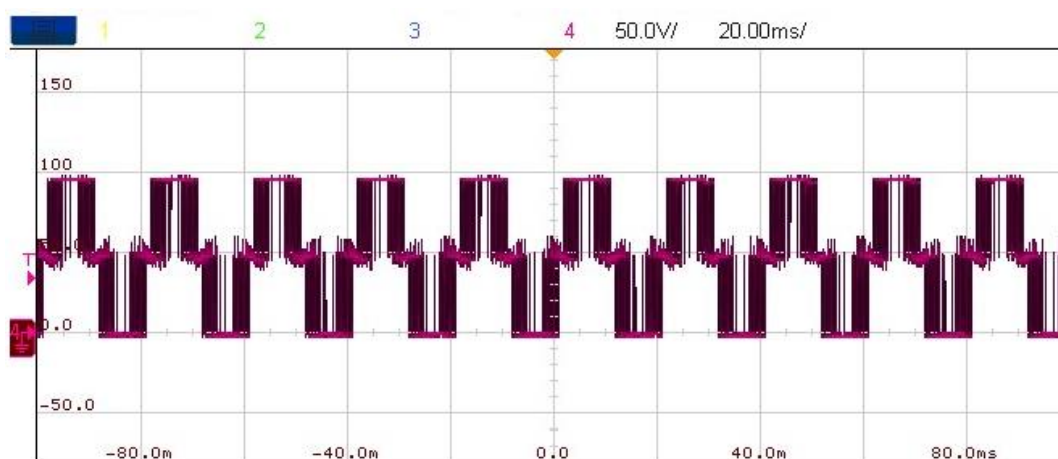
Las forma de onda de la Fig. 10-4.1 (a) y (b) las cuales representan las corriente de la rama positiva y negativa del M^2C para los parámetros mencionados anteriormente, estas fueron capturadas a una escala vertical de $500 [mA/div]$. Eso explica los valores del eje “Y”, donde cada división vertical representa $500 [mA]$. La amplitud Peak to Peak de las formas de onda esta alrededor de $1 [A]$, ya que oscilan entre $0 [mA]$ y $1 [A]$. La escala en el eje “X” de tiempo horizontal es de $10.00 [ms/div]$ del osciloscopio, indicando aproximadamente 4 periodos de señal. Al ser una medición directa con un osciloscopio, estas formas de onda muestran la corriente real circulando por la rama positiva y negativa del M^2C monofásico en tiempo real.

Mediante el cálculo de la ecuación (3-4.1) y el sensado de las corrientes de rama es posible determinar la corriente de carga del M^2C , por ende, la señal es enviada a la Dspace y posteriormente al osciloscopio para su procesamiento, La señal se calibra en el eje vertical con una escala de $500 [mA/div]$, y en el eje horizontal con una escala de $10 [ms/div]$, muestra una onda sinusoidal con ruido superpuesto con un THD del 24.863% el cual se obtiene mediante la función **FFT** que dispone el osciloscopio, característica de la corriente en un sistema M^2C con modulación PWM. La forma de onda oscila entre aproximadamente $+0.7 [A]$ y $-0.7 [A]$, indicando una amplitud de Peak to Peak aproximada de $1.4 [A]$. El periodo de una oscilación completa es de alrededor de $20 [ms/div]$, sugiriendo una frecuencia fundamental de $50 [Hz]$. Finalmente, el ruido presente en la señal podría deberse a la naturaleza de la modulación PWM y las condiciones experimentales del montaje, esta información es esencial para analizar el comportamiento del M^2C .

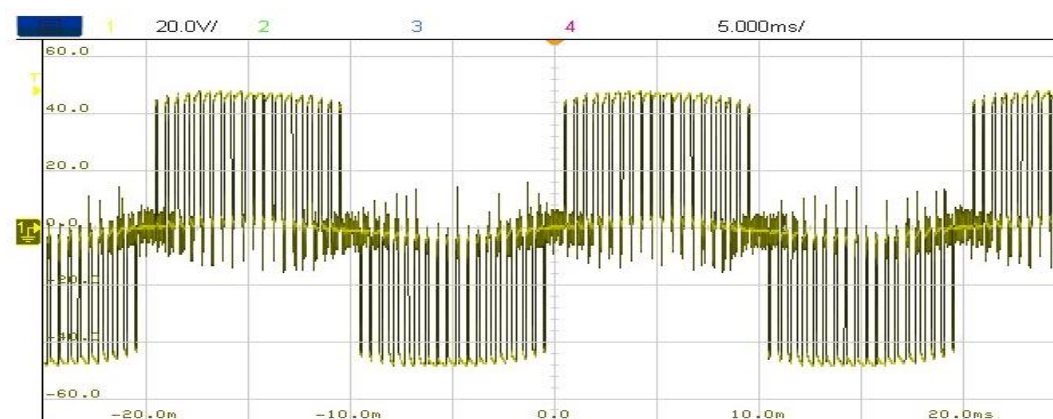
Formas de onda de voltaje V_P , V_N , V_{Carga} y balance de condensadores V_{C1} , V_{C2} , V_{C3} y V_{C4} :



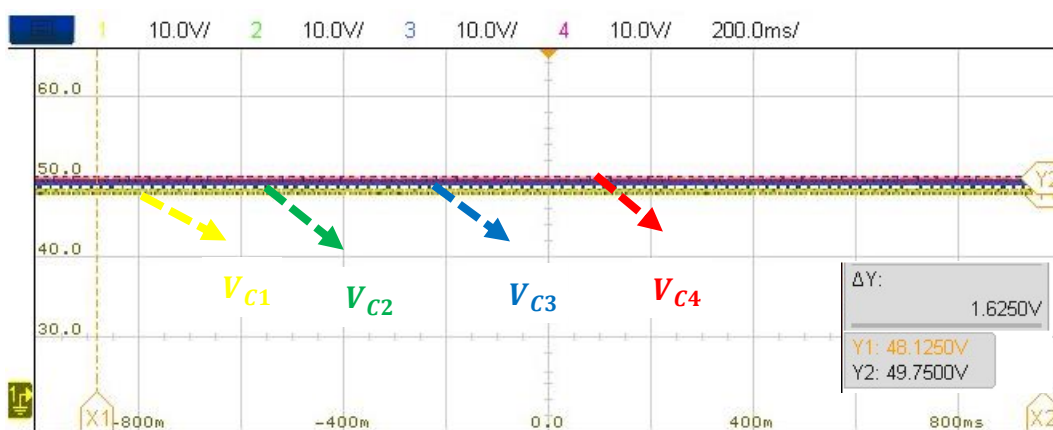
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11-4.1 Voltajes del M^2C prueba 2.
 (a) Rama positiva, (b) Rama negativa, (c) Carga, (d) Balance.

Las formas de onda de voltaje en los terminales de los submódulos de la rama positiva y negativa se obtienen directamente del setup en funcionamiento, por ende, reflejan el comportamiento de estos a través de las ramas del convertidor en tiempo real, como se aumentó parámetros de la fuente de alimentación el efecto que hay en dichos parámetros es directamente proporcional, en donde se obtienen los 3 niveles de voltaje pero de mayor amplitud respecto al caso anterior, estos niveles son 0, 50 y 100 [V] los cuales se muestran en la Fig. 11-4.1 (a) y (b).

Como se mencionó anteriormente se aumenta el voltaje de alimentación a 100 [V] y se satura la corriente en ± 1.5 [A] con el propósito de ver el comportamiento del voltaje de salida del M^2C . la ventaja que tiene esta topología de convertidor con sus ramas separadas y el control preciso es que mantiene las tensiones opuestas en cada rama, permitiendo que los offsets se anulen entre sí cuando se combinan ambas formas de onda en la carga. Esto resulta en una forma de onda sin componentes de offset indeseados, por lo tanto, se comprueba el correcto funcionamiento con los resultados obtenidos, para este caso el voltaje de carga PWM el cual se muestra en la Fig. 11-6.1 (c) con una amplitud de 50 [V] y centrado en 0 [V] sin la presencia de dicho componente.

Se muestra en la Fig. 11-4.1 (d) las formas de onda de voltaje de los condensadores de la rama positiva y negativa del M^2C monofásico experimental. Los voltajes de balance son importantes para mantener el equilibrio de tensiones y corrientes entre las ramas y garantizar un correcto funcionamiento del convertidor. De igual manera que el caso anterior se hace uso de los cursores del eje "Y" con el propósito de ver el " ΔY " que hay entre dichos condensadores, para este caso en que la fuente de alimentación se ajustó a 100 [V], siendo esperable que el voltaje en los condensadores aumente hasta llegar a un valor cercano a los 50 [V] DC, se aplica dicho proceso en cual se obtiene que esta diferencia corresponde a 1.6250 [V], siendo este valor menor en comparación al caso anterior, de lo cual se concluye que al aumentar el voltaje de alimentación se reduce esta diferencia.

Finalmente, en ambas imágenes de voltaje de salida hay un ruido presente las formas de onda sugiriendo de la etapa de conmutación y/o tiempo de muestreo en el cual el osciloscopio es capaz de procesar. el "ruido" observado alrededor de 0 [V] sea efecto producido por el proceso de muestreo y cuantización del osciloscopio, y no necesariamente representativo del comportamiento real del circuito experimental.

4.4. Discusión

Se establece el esquema de balance de los condensadores del M^2C monofásico en simulación y a través del setup experimental, se obtienen resultados semejantes tanto en la simulación como en lo experimental, donde en ambos casos mantiene los valores de referencias impuestos por el usuario. En el cual la desviación de los condensadores para la etapa de simulación experimental considerando un voltaje de 100 [V] se encuentra por debajo del 5% (1.6 [V]) fijado como parámetro. Si bien para un voltaje de alimentación de 50 [V] aplicado en la prueba 1 se obtuvo una desviación de 7.5% (1.8 [V]), se puede concluir que al aumentar el voltaje de alimentación disminuye dicha desviación entre los condensadores.

Para establecer el funcionamiento del M^2C monofásico experimental fue necesario una serie de pasos, de tal forma de mantener la seguridad, antes de poder conectar el setup a la fuente de alimentación DC, en la cual fue necesario una correcta conexión entre los módulos Gate Drives, IGBT's, condensadores, resistencia e inductancias, además, se realizaron una serie de pruebas registrando cada resultado de forma directa mediante el osciloscopio y en la interfaz del ControlDesk en tiempo real con el fin de llevar un control de las señales de voltaje y corriente.

Se destaca la versatilidad del M^2C monofásico, siendo una de estas la estabilidad del voltaje de los condensadores gracias al esquema de balance implementado en dicha etapa, por lo tanto, el convertidor utilizado cumple con las características de impuestas previamente.

Capítulo 5. Filtro de Kalman

5.1. Introducción

En este capítulo se procederá al análisis y explicación del filtro de Kalman, algoritmo empleado para la estimación de estados en sistemas dinámicos basándose en mediciones realizadas [13] y [15]. Dicho algoritmo consta de dos etapas principales, a saber, predicción y corrección, en las cuales se realiza de manera iterativa un ajuste de la estimación obtenida. Se aplicará el mencionado filtro al modelo dinámico de los condensadores ideales presentes en el M^2C monofásico mediante simulación en Matlab-Simulink. Esto con el objetivo de estimar el valor de capacitancia de los condensadores al tener un control de estos durante todo el tiempo en que se encuentren operando, la ventaja que proporciona este método es que no requiere agregar sensores adicionales al sistema, con las mediciones que ya se tienen es posibles implementarlo.

5.2. Modelo del filtro de Kalman

En este contexto, el filtro de Kalman se presenta como un estimador dinámico que posibilita el conocimiento aproximado de estados en tiempo real mediante la realización de mediciones. A diferencia de otros estimadores, el filtro de Kalman tiene la capacidad de ser empleado en sistemas donde existe presencia de ruido. El modelo en cuestión puede ser expresado matemáticamente en términos de dos ecuaciones principales [13].

Ecuación de predicción:

$$x'_{(k)} = F_{(k)}x_{(k-1)} + B_{(k)}u_{(k)} \quad (1-5.1)$$

$$P'_{c(k)} = F_{(k)}P_{c(k-1)}F'_{(k)} + Q_{c(k)} \quad (2-5.1)$$

Ecuación de actualización:

$$K_{(k)} = P'_{c_{(k)}} H'_{(k)} (H_{(k)} P'_{c_{(k)}} H'_{(k)} + R_{c_{(k)}})^{-1} \quad (3-5.1)$$

$$x_{(k)} = x'_{(k)} + K_{(k)} (z_{(k)} - H_{(k)} x'_{(k)}) \quad (4-5.1)$$

$$P_{c_{(k)}} = (I - K_{(k)} H_{(k)}) P'_{c_{(k)}} \quad (5-5.1)$$

Donde se tiene que:

$x'_{(k)}$: Es la estimación del estado en el tiempo k.

$F_{(k)}$: Es la matriz de transición de estado.

$B_{(k)}$: Es la matriz de entrada de control.

$u_{(k)}$: Es la entrada de control.

$P_{c_{(k)}}$: Es la matriz de covarianza del error de estimación.

$Q_{c_{(k)}}$: Es la covarianza del ruido del sistema.

$H_{(k)}$: Es la matriz de medición.

$R_{c_{(k)}}$: Es la covarianza de ruido de medición.

$z_{(k)}$: Es la medición en el tiempo k.

$K_{(k)}$: Es la matriz de identidad.

Las ecuaciones mencionadas describen el proceso mediante el cual se realiza la estimación del estado futuro, y cómo esta estimación es actualizada a través de nuevas mediciones obtenidas en tiempo real. El filtro de Kalman es de naturaleza iterativa, lo que implica que es aplicado sucesivamente a medida que se obtienen nuevas mediciones, dando como resultado una estimación optimizada del estado del sistema, que toma en consideración tanto la información proveniente de las mediciones como la dinámica intrínseca del sistema.

Entre las ventajas que ofrece el uso del filtro de Kalman, se encuentra su eficacia en sistemas donde existe presencia de ruido. No obstante, su aplicación se ve limitada en escenarios donde la dinámica del sistema no se encuentra correctamente caracterizada o modelada.

A modo de resumen se presenta el esquema de la Fig. 1-5.1 el cual representa el funcionamiento del filtro de Kalman con las ecuaciones descritas anteriormente, en el cual se muestra la etapa de predicción donde ocurre la estimación de estado y la matriz de covarianza del error, posterior a ello se pasa a la etapa de corrección para el cálculo de la ganancia de Kalman. Finalmente, la actualización de estimación de estado y de covarianza del error del sistema, este ciclo se repite de manera iterativa.

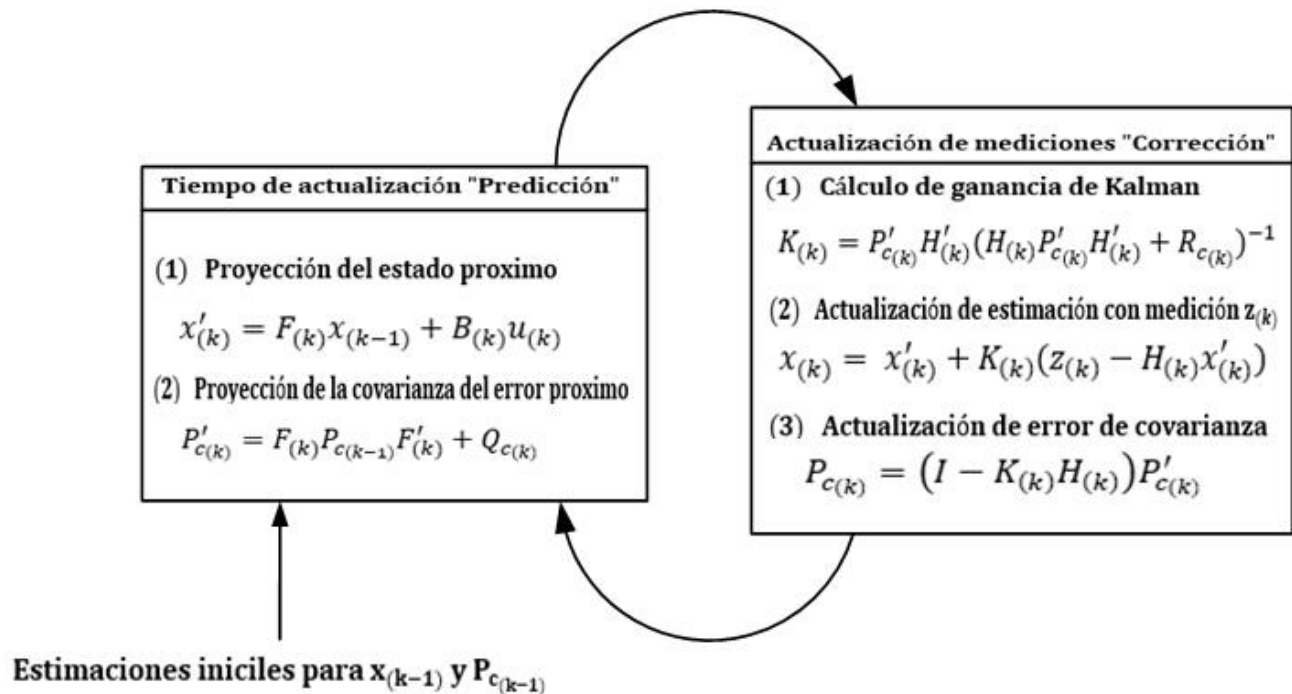


Fig. 1-5.1 Imagen completa del funcionamiento del filtro de Kalman combinado con las ecuaciones de predicción y actualización.

5.3. Algoritmo del filtro de Kalman aplicado al modelo dinámico del capacitor ideal

A continuación, se procederá a presentar el algoritmo del filtro de Kalman ajustado al modelo dinámico del capacitor ideal, el cual consta principalmente de dos etapas fundamentales. Cabe destacar que las ecuaciones necesarias para la construcción del filtro de Kalman en Matlab-Simulink son las que se describen desde la ecuación (6-5.1) hasta (12-5.1).

Ecuaciones de predicción:

Estimación del estado previsto (a priori)	$X_{k k-1} = X_{k-1 k-1}$	(6-5.1)
---	---------------------------	---------

Covarianza estimada prevista (a priori)	$P_{k k-1} = P_{k-1 k-1} + Q_k$	(7-5.1)
---	---------------------------------	---------

Ecuaciones de actualización:

Vector de medición	$y_k = \left(\frac{V_{dc_k} - V_{dc_{k k-1}}}{Dt} \right) - icap_{k k-1} \cdot X_{k k-1}$	(8-5.1)
--------------------	--	---------

Matriz de innovación de covarianza	$S_k = icap_{k k-1} \cdot P_{k k-1} \cdot icap_{k k-1} + R_k$	(9-5.1)
------------------------------------	---	---------

Ganancia de Kalman optima	$K_k = P_{k k-1} \cdot icap_{k k-1} \cdot S_k^{-1}$	(10-5.1)
---------------------------	---	----------

Estimación del estado actualizada (a posteriori)	$X_{k k} = X_{k k-1} + K_k \cdot y_k$	(11-5.1)
--	---------------------------------------	----------

Covarianza estimada actualizada (a posteriori)	$P_{k k} = (1 - K_k \cdot icap_{k k-1}) \cdot P_{k k-1}$	(12-5.1)
--	--	----------

En este caso la estimación del estado que se obtiene como salida es de $X_{k|k} = \frac{1}{C}$, por lo que para obtener la capacitancia “C” buscada, es necesario ingresarlo por un bloque **Resiprocal** y de esta manera conocer este valor. Respecto al termino $\left(\frac{Vdc_k - Vdc_{k|k-1}}{Dt}\right)$ corresponde a la medición en tiempo k del condensador, donde Vdc_k es la medición de voltaje en el tiempo actual y $Vdc_{k|k-1}$ el valor en pasado debido a que se obtiene a la salida del bloque **UnitDelay** el cual aplica un retardo en dicha medición.

Donde R_k y Q_k son matrices de covarianza utilizadas para el ajuste en diseño del filtro de Kalman, Q_k es la matriz que define el ruido de proceso del sistema donde este valor no debe ser tan grande de lo contrario implica que dicho modelo tiene ruido. Por otra parte, si R_k tiene un valor alto quiere decir que los sensores a la salida del sistema son ruidosos.

La estrategia consta de conectar en paralelo otro condensador de igual o diferente valor de capacitancia (C_{K1}, C_{K2}, C_{K3} y C_{K4}) los cuales se activan o desactivan mediante un Switch tal como se aprecia en la topología ilustrada en la Fig. 2-5.1 para los condensadores C_1, C_2, C_3 y C_4 . Transcurrido el tiempo desde el inicio de la simulación, se procederá al cierre y apertura de los interruptores, lo cual provocará un impacto en el valor de la capacitancia de cada rama del M^2C monofásico. Se realizarán dos pruebas distintas: en la primera, los condensadores adicionales tendrán el mismo valor de capacitancia que el condensador original; mientras que, en la segunda prueba, se utilizarán los condensador adicionales con un valor de capacitancia diferente. El objetivo de estas pruebas es registrar y establecer el monitoreo del comportamiento del filtro ante un aumento en el valor de la capacitancia total del circuito.

5.4.1 Esquemas de filtro de Kalman para los condensadores del M^2C monofásico

Ajuste de parámetros del filtro de Kalman R y Q :

Para llevar a cabo el proceso de ajuste, se ha establecido un valor de capacitancia de 1000 [μF] como parámetro de referencia. El objetivo principal de esta asignación es ajustar los parámetros del sistema de manera que los resultados obtenidos sean congruentes con el valor de capacitancia previamente establecido. En este contexto, se han adoptado los valores de $R = 10000$ y $Q = 0.001$ para las covarianza. Es importante señalar que la selección de estos valores no es arbitraria, sino que se basa en estándares comúnmente utilizados en la literatura especializada sobre el tema.

Cuanto menor sea el valor de R , mayor será la confiabilidad atribuida a la medición. De manera análoga, un valor menor de Q implica una mayor precisión del modelo. No obstante, es fundamental subrayar que estos parámetros no deben ser establecidos en cero, ya que representan la incertidumbre asociada al ruido inherente en el sistema. La consideración de valores no nulos para R y Q refleja, por tanto, un enfoque realista que reconoce la presencia inevitable de incertidumbres y perturbaciones en los sistemas físicos.

Filtro de Kalman para condensadores de la rama positiva:

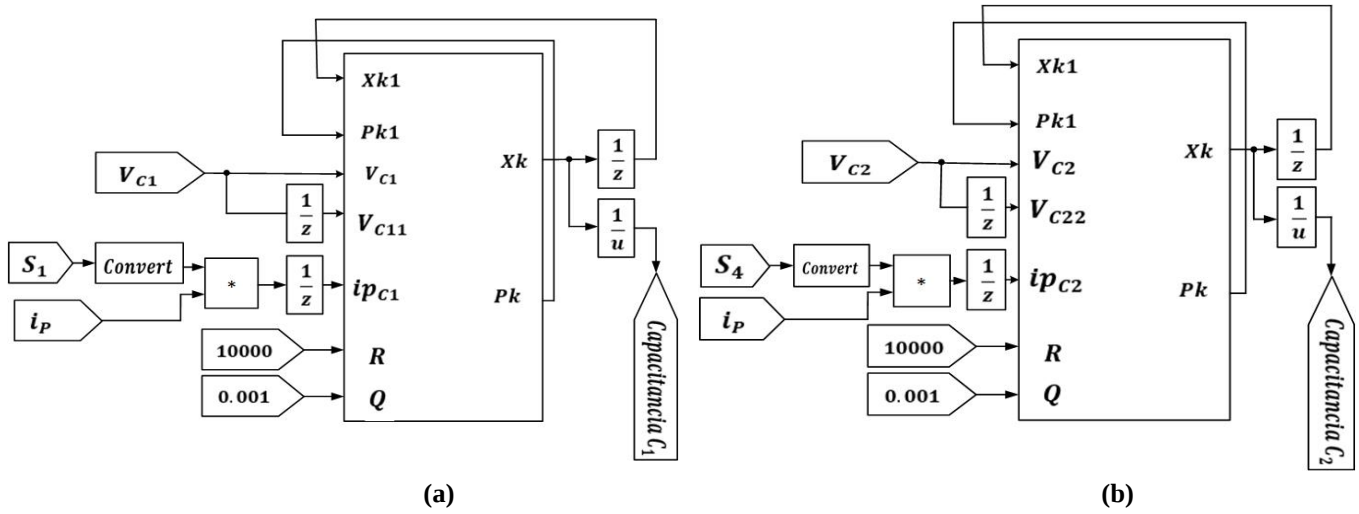


Fig. 3-5.1 Esquema de filtro de Kalman implementado para los condensadores de la rama positiva.
(a) Capacitancia C_1 , (b) Capacitancia C_2 .

Filtro de Kalman para condensadores de la rama negativa:

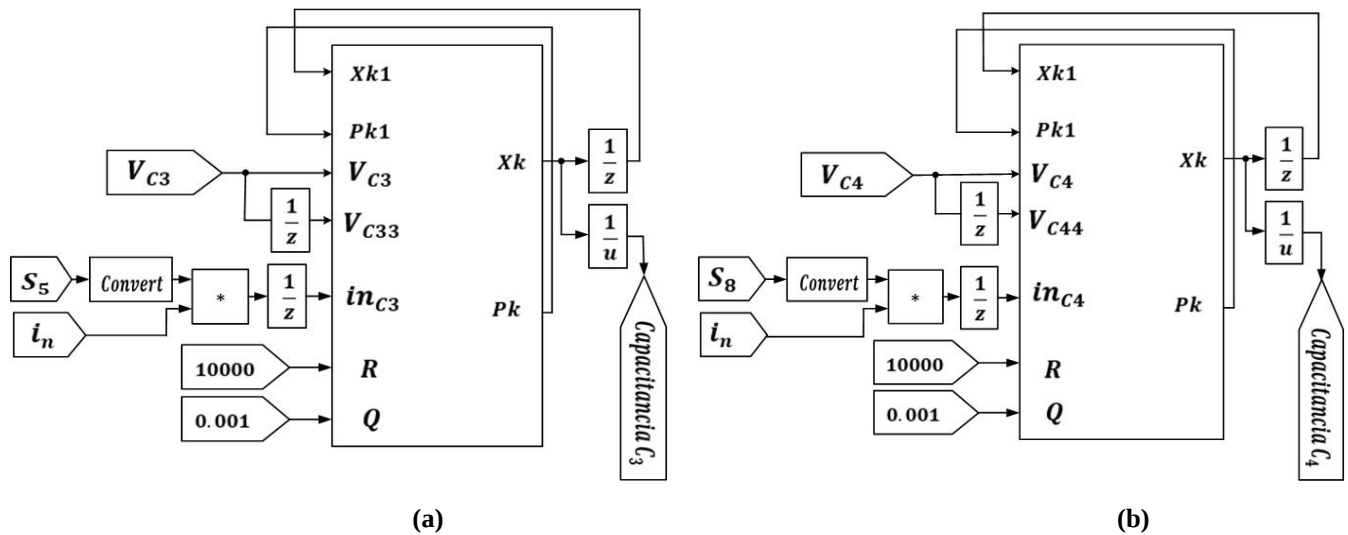


Fig. 4-5.1 Esquema de filtro de Kalman implementado para los condensadores de la rama negativa.
(a) Capacitancia C_3 , (b) Capacitancia C_4 .

Las variables de interés son las mediciones de corriente de la rama positiva, negativa y los voltajes de los condensadores C_1 , C_2 , C_3 y C_4 , de estas mediciones se hará la predicción del valor de capacitancia mediante el algoritmo propuesto anteriormente que involucra el modelo dinámico de un condensador ideal.

En los diagramas representados en las Figuras 3-5.1 y 4-5.1, se ilustra el esquema operativo del filtro de Kalman en conjunto con el Modelo del M^2C monofásico simulado. En este contexto, se procede al ajuste de los parámetros mediante la manipulación de las matrices de covarianza R y Q , con el propósito de obtener un valor de capacitancia optimizado. Resulta de vital importancia la adquisición precisa de las variables eléctricas, de manera tal que se puedan efectuar mediciones fidedignas de las variables presentes en el modelo dinámico. Estas mediciones, una vez obtenidas, deben ser aplicadas en tiempo real al filtro de Kalman para garantizar la eficacia y precisión del proceso de estimación.

Parámetros de tiempo para impactos de capacitancia:

Tabla 1-5.1 Tiempos de impacto y valor de capacitancia.

Tiempo	0 a 4 seg.	4 a 13 seg.	13 a 17 seg.	17 a 26 seg.	26 a 30 seg.
Valor capacitancia	C_1	$C_1 + C_{K1}$	C_1	$C_1 + C_{K1}$	C_1
Rama positiva	C_2	$C_2 + C_{K2}$	C_2	$C_2 + C_{K2}$	C_2

Tiempo	0 a 4 seg.	4 a 13 seg.	13 a 17 seg.	17 a 26 seg.	26 a 30 seg.
Valor capacitancia	C_3	$C_3 + C_{K3}$	C_3	$C_3 + C_{K3}$	C_3
Rama negativa	C_4	$C_4 + C_{K4}$	C_4	$C_4 + C_{K4}$	C_4

Tal como se ilustra en la configuración topológica presentada en la Fig. 2-5.1, se conectan switchs en serie a los condensadores C_1 , C_2 , C_3 y C_4 con el fin de poder activar o desactivar los impactos de capacitancia provenientes de los condensadores conectados en paralelo (C_{K1} , C_{K2} , C_{K3} y C_{K4}) esto para diferentes instantes de tiempo como se muestra en la Tabla 1-5.1, esta acción provocará un cambio significativo en el valor de la capacitancia del sistema. El propósito de este proceso es ver el comportamiento del filtro de Kalman ante el aumento y disminución del valor de capacitancia.

5.4.2 Resultados de pruebas de impacto de capacitancia

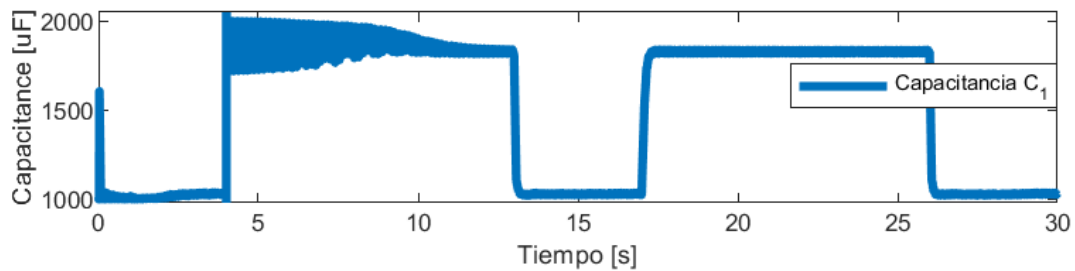
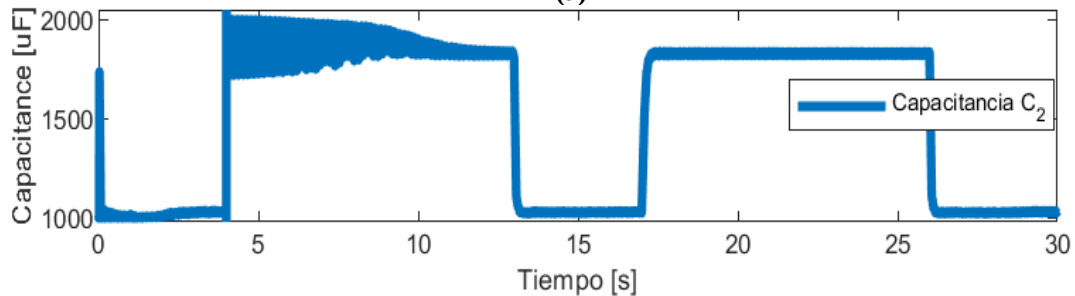
Consideración para el tiempo de muestreo:

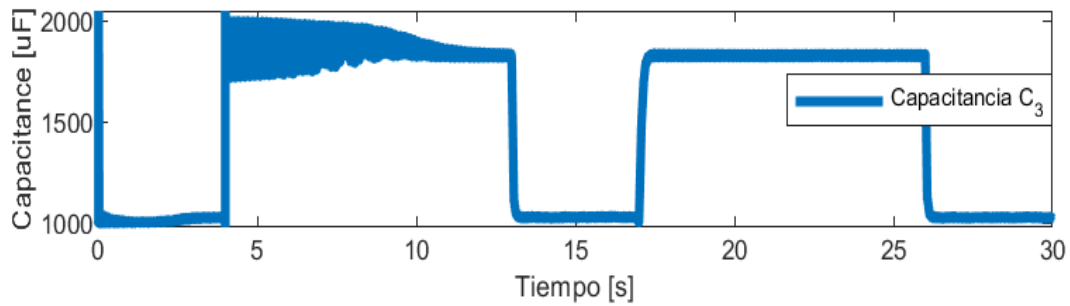
El modelo del filtro de Kalman funciona siempre y cuando la corriente que circula por el condensador no sea igual a cero, como el M^2C monofásico se cuenta con dos condensadores por modulo y hay veces que los módulos no necesariamente están conectados (hay instantes de tiempo en que no circula corriente por el condensador) por ende, durante todo ese instante que no circula el Kalman no es observable, por lo que, al considerar un tiempo de muestreo rápido (30 [μ s]) la forma de onda de corriente se muestrea tan rápido que el algoritmo no distingue si esta es distinta de cero por lo cual diverge, la solución es considerar un tiempo de muestreo más lento para este caso 2 [μ s] con esto el algoritmo es capaz de detectar estos cruces por cero y subidas de la corriente diferenciando que es distinto de cero con lo logra converger.

prueba 1.**Tabla 2-5.1 Valor de capacitancia actual y capacitancia para impacto prueba 1.**

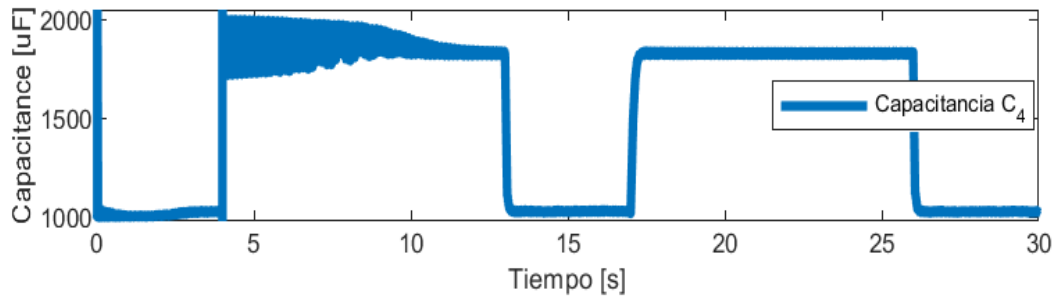
Capacitancia actual	Impactos de capacitancia	Tiempo de muestreo
$C_1 = 1000 [\mu F]$	$C_{K1} = 1000 [\mu F]$	2 $[\mu s]$
$C_2 = 1000 [\mu F]$	$C_{K2} = 1000 [\mu F]$	
$C_3 = 1000 [\mu F]$	$C_{K3} = 1000 [\mu F]$	
$C_4 = 1000 [\mu F]$	$C_{K4} = 1000 [\mu F]$	

En las siguientes figuras se muestran los Resultados obtenidos de la prueba número 1, esto considerando los parámetros descritos en la Tabla 2-5.1 para un tiempo de muestreo de 2 $[\mu s]$ y los tiempos indicados en la Tabla 1-5.1.

**(a)****(b)****Fig. 5-5.1 Resultados prueba 1 de impactos de capacitancia rama positiva.****(a) Capacitancia C_1 , (b) Capacitancia C_2 .**



(a)

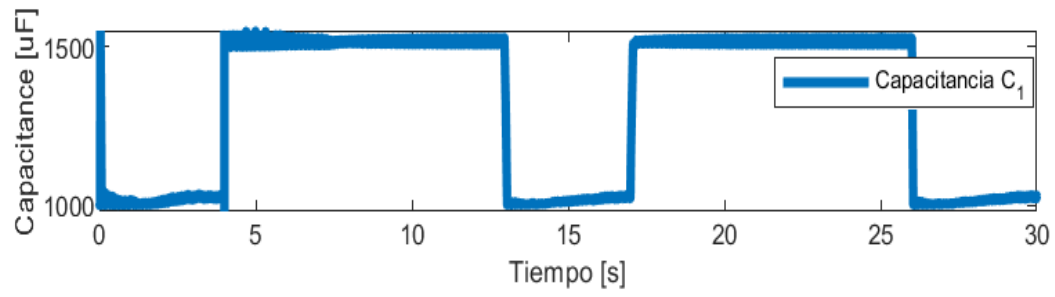


(b)

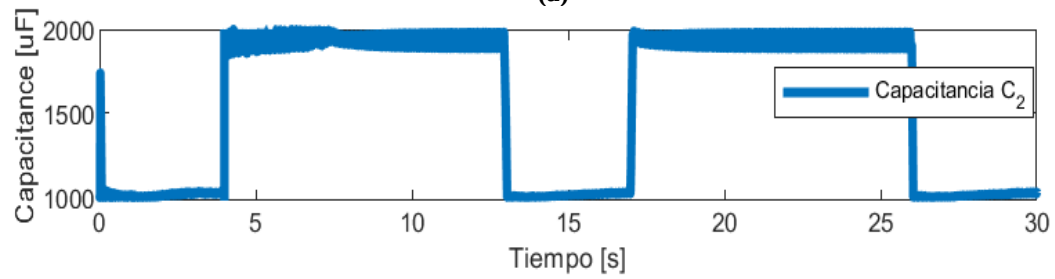
Fig. 6-5.1 Resultados prueba 1 de impactos de capacitancia rama negativa.(a) Capacitancia C_3 , (b) Capacitancia C_4 .**Prueba 2.****Tabla 3-5.1 Valor de capacitancia actual y capacitancia para impacto prueba 2.**

Capacitancia actual	Impactos de capacitancia	Tiempo de muestreo
$C_1 = 1000 [\mu F]$	$C_{K1} = 500 [\mu F]$	2 [μs]
$C_2 = 1000 [\mu F]$	$C_{K2} = 1000 [\mu F]$	
$C_3 = 1000 [\mu F]$	$C_{K3} = 1500 [\mu F]$	
$C_4 = 1000 [\mu F]$	$C_{K4} = 2000 [\mu F]$	

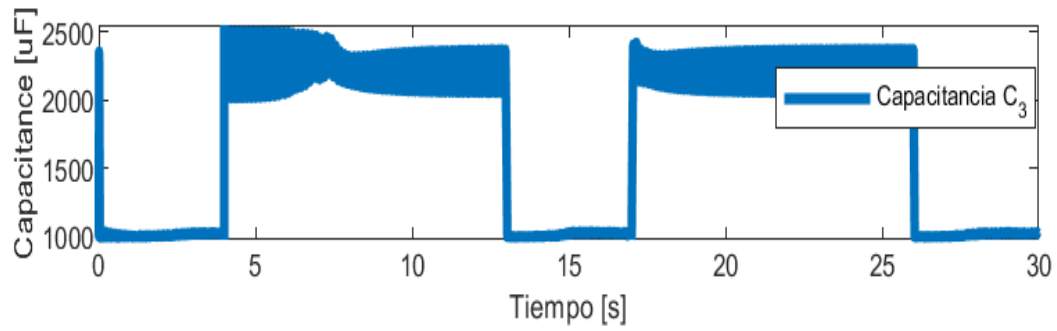
Para esta simulación se mantienen los valores de capacitancia de los condensadores C_1 , C_2 , C_3 y C_4 en 1000 [μF] y los tiempo presentados en la Tabla 1-5.1, posteriormente se aplican impactos de capacitancia en donde se ajustan los condensador adicionales con un valor de capacitancia diferente como se muestra en la Tabla 3-5.1, esto con el fin de poder ver el comportamiento del filtro de Kalman ante dichas condiciones.



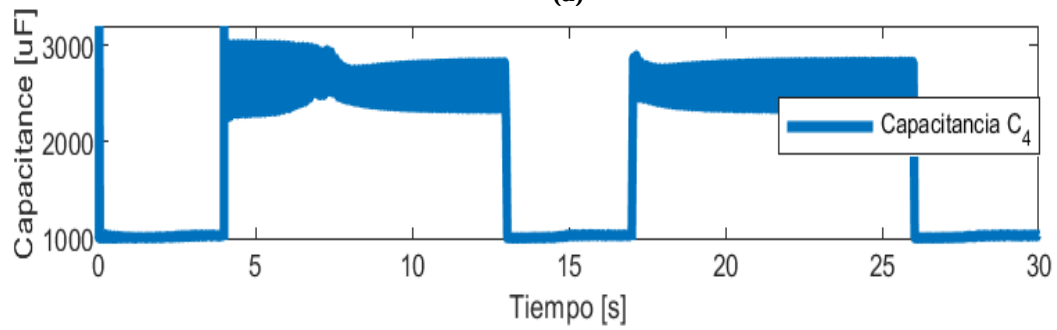
(a)



(b)

Fig. 7-5.1 Resultados prueba 2 de impactos de capacitancia rama positiva.(a) Capacitancia C_1 , (b) Capacitancia C_2 .

(a)



(b)

Fig. 8-5.1 Resultados prueba 2 de impactos de capacitancia rama negativa.(a) Capacitancia C_3 , (b) Capacitancia C_4 .

El algoritmo del filtro de Kalman, al ser aplicado al modelo dinámico del capacitor, permite un monitoreo continuo del valor de capacitancia a lo largo del tiempo simulado. Mediante un meticuloso ajuste de parámetros, específicamente a través de la calibración de las matrices de covarianza Q y R , se logra una optimización del modelo que mantiene el valor de capacitancia dentro de un rango de fluctuación controlado. Es importante señalar que este modelo opera bajo condiciones ideales.

Las pruebas realizadas han demostrado la eficacia del filtro de Kalman frente a incrementos y disminuciones en el valor de capacitancia. Este aspecto es de particular relevancia, lo que subraya la importancia de un control preciso en un escenario hipotético donde el capacitor opera bajo condiciones ideales. Esta sensibilidad se debe a que el modelo incorpora variables medidas en tiempo real. Incluso una variación mínima en el valor medio de la corriente que atraviesa el capacitor puede inducir alteraciones notables en la estimación resultante. Es pertinente destacar que, al tratarse de un entorno ideal en la simulación, no se contemplan las posibles imprecisiones derivadas de la calibración de los sensores, factor que en un escenario real podría influir en la exactitud de las mediciones y, por ende, en la eficacia del sistema de monitoreo.

5.5. Discusión

El modelo del algoritmo de Kalman requiere de las mediciones de voltaje y corriente de los condensadores de forma adecuada, puesto que el mal funcionamiento, se tendrá una errónea estimación o monitoreo del valor de capacitancia. Luego por los impactos de valor de capacitancia se pudo corroborar el monitoreo activo por medio de la activación de un condensador en paralelo.

La implementación de este estimador de capacitancia basado en el Filtro de Kalman se fundamenta en la necesidad de abordar la incertidumbre asociada a las fallas potenciales o al término de la vida útil del componente. Este método de monitoreo activo presenta ventajas significativas en comparación con las metodologías tradicionales. En los enfoques convencionales, el mantenimiento y monitoreo de estos componentes requiere la desactivación del convertidor, seguida de una medición invasiva del valor de capacitancia. En contraste, el método propuesto, que emplea el filtro de Kalman,

permite un monitoreo continuo y no intrusivo a través de la medición de las variables eléctricas del condensador, manteniendo el convertidor en pleno funcionamiento. Esta aproximación facilita la implementación de estrategias de mantenimiento programado basadas en la observación en tiempo real por parte del operador. Como resultado, se logra una extensión de la vida útil del convertidor, se mantienen niveles óptimos de seguridad y eficiencia, y se obtienen ahorros significativos en costos operativos. La capacidad de realizar un monitoreo continuo sin interrumpir la operación del sistema representa un avance significativo en la gestión y mantenimiento de sistemas de conversión de energía, permitiendo el mantenimiento de infraestructuras críticas.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

En el presente informe de habilitación profesional se realizó el estudio, simulación y aplicación experimental del M^2C monofásico con la topología de celda SINAMICS de Siemens, el cual contemplo el diseño de una estrategia de control destinada a lograr una estabilidad y/o balance adecuado en los condensadores de la celda haciendo uso de una modulación PWM, esto a través del software Matlab-Simulink se obtuvieron los resultados de simulación respectivos. Luego se dio paso al Setup experimental el cual se llevó a cabo en el Laboratorio de Electrónica de Potencia Aplicada (LEPA 1) esto una vez validados los resultados obtenidos mediante simulación, los parámetros censados fueron exportados a la interfaz microLabox-Dspace con el propósito de monitorear las variables de interés en tiempo real. Finalmente, con el modelo de simulación operando correctamente, se realizó el estudio e implementación del algoritmo del filtro de Kalman a los condensadores presentes en la celda SINAMICS de la rama positiva y negativa del M^2C con el fin de poder ver el monitoreo de la estimación ante impactos de capacitancia.

6.2. Conclusiones

Se ha logrado demostrar que la forma de onda del voltaje de salida de la rama positiva y negativa correspondiente a esta configuración presenta una amplitud de tres niveles y el voltaje de carga una amplitud de 2 niveles, cuya determinación está sujeta a múltiples factores críticos. Entre estos factores se incluyen: la capacidad de almacenamiento de cada condensador, los estados predefinidos de los interruptores (switch) para la conmutación en dicha celda, el voltaje de alimentación establecido en la fuente alimentación (DC), y el esquema de balance propuesto para mantener el equilibrio de los condensadores. Todos estos parámetros han demostrado ser elementos esenciales en la consecución del objetivo propuesto. La interacción sinérgica de estas variables ha permitido la implementación exitosa de la celda SINAMICS, validando así su eficacia.

El análisis del estado del arte, en conjunción con la estrategia de balance propuesta para nuestro sistema, ha permitido la obtención de resultados que satisfacen las expectativas para la validación de la celda SINAMICS, logrando así un voltaje de salida congruente con la configuración implementada. Adicionalmente, se ha conseguido un equilibrio en el voltaje de los condensadores, establecido en conformidad con las condiciones de simulación y corroborado de manera experimental mediante el setup de prueba implementado. De esta manera, se han abordado de forma integral todos los objetivos, garantizando una operación óptima y estable del sistema. Este enfoque metodológico ha demostrado su eficacia tanto en el ámbito teórico como en su aplicación práctica.

Los voltajes de los condensadores oscilan de manera conjunta, sin presentar desviaciones significativas entre las celdas presentes en la rama positiva, y de igual manera para la rama negativa ($5\% <$). Como resultado, se ha obtenido un equilibrio de voltaje óptimo en los condensadores del convertidor, lo cual es atribuible al número de celdas empleadas y a las condiciones previamente descritas. Esta característica de auto equilibrio representa una ventaja significativa en términos de eficiencia y fiabilidad del sistema. La capacidad de mantener un balance de voltaje adecuado sin necesidad de algoritmos de balance complejos.

A partir de las pruebas de simulación mediante Matlab-Simulink se logra establecer el monitoreo de estimación del valor de capacitancia de los condensadores del M^2C monofásico, ante variaciones de aumento y disminución de impactos de capacitancia. El algoritmo es capaz de estimar el este aumento en el instante de tiempo en que ocurre y posteriormente vuelve al valor de capacitancia actual del condensador. En síntesis, la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real del condensador conlleva múltiples ventajas para la longevidad y eficiencia del convertidor. Entre estas se incluyen: la detección temprana de fallos, la optimización de los procesos operativos, la planificación estratégica del mantenimiento y la reducción significativa de los períodos de inactividad.

6.3. Trabajos futuros

Los trabajos futuros que deja el presente trabajo de investigación pueden ser variados y dependen del tipo de aplicación y topología que se busque desarrollar, dentro de las cuales destacan las siguientes:

- Optimizar el algoritmo de Kalman para que no opere a frecuencias de muestreo elevadas. Se espera que el dicho tiempo sea equivalente a la frecuencia de la señal portadora.
- Utilizar la celda SINAMICS con sistemas de almacenamiento de baterías.

Bibliografía

- [1] *M2C technology*. (2023, October 4). Innomotics.
<https://www.innomotics.com/en/products/technology/m2c-technology.html>
- [2] R. Lizana, M. Perez, A. Dekka and B. Wu, “Capacitor voltage balancing method for modular multilevel converter with flying capacitor submodules,” 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 60-65, doi: 10.1109/ICIT.2017.7913059.
- [3] M. Perez, S. Bernet, J. Rodriguez, S. Kouro, and R. Lizana, “Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 1, pp. 4–17, Jan 2015.
- [4] A. Dekka, B. Wu, R. L. Fuentes, M. Perez, and N. R. Zargari, “Evolution of Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 5, no. 4, pp. 1631–1656, Dec 2017.
- [5] Salinas, Fernando & Gonzalez, Mario & Escalante, Miguel. (2010). “Voltage balancing scheme for flying capacitor multilevel converters”. *Power Electronics, IET*. 6. 10.1109/CIEP.2010.5598912.
- [6] A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen and G. D. Demetriades, “Modular Multilevel Converters for HVDC Applications: Review on Converter Cells and Functionalities,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 18-36, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2327641.
- [7] S. Debnath, et al., “Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 37–53, Jan 2015, doi:10.1109/TPEL.2014.2309937.

- [8] Zhongxi Li, Ricardo Lizana, Angel V. Peterchev, Senior Member, IEEE, Stefan M. Goetz, “Distributed Balancing Control for Modular Multilevel Series/Parallel Converter with Capability of Sensorless Operation” in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017.
- [9] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodríguez, M. A. Perez, and J. I. Leon, “Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug 2010.
- [10] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng, “Multi-level inverter: a survey of topologies, controls, and applications,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.49, no.4, pp.724–738, Aug.2002.
- [11] Dekka, Apparao & Wu, Bin & Zargari, Navid & Fuentes, Ricardo. (2015). “Dynamic Voltage Balancing Algorithm for Modular Multilevel Converter: A Unique Solution”. IEEE Transactions on Power Electronics. 31. 1-1. 10.1109/TPEL.2015.2419881.
- [12] O. Abushafa, S. Gadoue, M. Dahidah, D. Atkinson and S. Ethni, “Control strategies for capacitor voltage balancing in modular multilevel converters,” 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC.2016.7478938.
- [13] Islam, Didarul & Razzaghi, Reza & Bahrani, Behrooz. (2019). Arm-Sensorless Sub-Module Voltage Estimation and Balancing of Modular Multilevel Converters. IEEE Transactions on Power Delivery. PP. 1-1. 10.1109/TPWRD.2019.2931287.
- [14] Welch, Greg & Bishop, Gary. (2006). An Introduction to the Kalman Filter. Proc. Siggraph Course. 8.
- [15] O. S. H. M. Abushafa, M. S. A. Dahidah, S. M. Gadoue and D. J. Atkinson, "Submodule Voltage Estimation Scheme in Modular Multilevel Converters with Reduced Voltage Sensors Based on

Kalman Filter Approach," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 9, pp. 7025-7035, Sept. 2018.

Anexo A. Validación de la celda SINAMICS

Simulación experimental de la celda SINAMICS:

Con el fin de validar la topología propuesta de la celda SINAMICS, se realizó el Setup que se muestra en la Fig. 6-A con el fin de obtener resultados experimentales de balance de los condensadores, voltaje de salida y corriente en la carga de dicho modelo. Los parámetros por considerar son los siguientes.

Tabla 1-A Valores numéricos simulación experimental celda SINAMICS.

Parámetros	Valor
C_1 y C_2 (Condensadores)	1000 μ F
V_{dc} (Voltage DC)	100 V, ± 1 A
Alimentación DC GATE DRIVE	15 V
R_c (Resistencia de carga)	100 Ω
Tiempo muerto (GATE DRIVE)	3.12 μ s
Tiempo de muestreo	30 μ s

Para realizar la simulación experimental de la celda SINAMICS es necesario implementar en el esquema de control un sistema que permita activar y/o desactivar la simulación desde la interfaz del **ControlDesk**. Esto se logra mediante la incorporación de un bloque **Enable**, el cual se mantiene en “0” (simulación no ejecutada) en el modelo desarrollado en Simulink. Posteriormente, esta señal es introducida en un bloque AND, que la compara con la señal de los estados provenientes del bloque **MATLAB Function**. Por lo tanto, es necesario establecer la referencia en “1” (simulación se ejecuta) desde el **ControlDesk**. Esto permite gestionar el control de la simulación desde un único punto. El esquema de control propuesto se ilustra en la Fig. 2-A.

Es importante señalar que, previamente, se deben medir los voltajes de los condensadores V_{C1} y V_{C2} , así como la corriente i_x . Esto es fundamental, ya que el algoritmo implementado en Matlab-Simulink requiere dichas mediciones para controlar el encendido y apagado de los IGBT.

Esquema de balance de los condensadores de la celda SINAMICS:

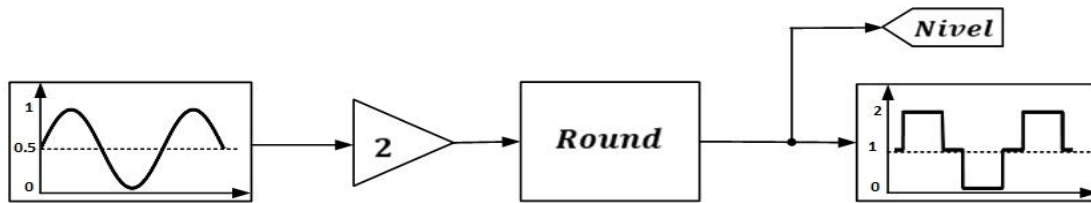


Fig. 1-A Generación señal de referencia nivel.

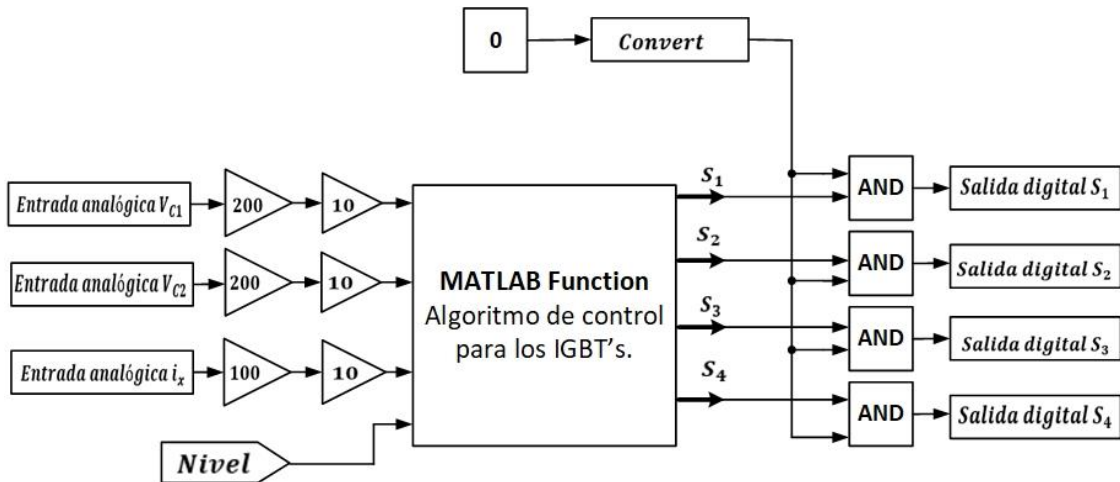


Fig. 2-A Esquema de balance de condensadores para simulación experimental.

A través del esquema de balance realizado en Matlab-Simulink que se muestra en la Fig. 2-A, se generan los pulsos de disparo (S_1 , S_2 , S_3 y S_4), estos pulsos se transmiten a la **Dspace** como salidas digitales y posteriormente a los módulos Gate Drive. Cabe destacar que la señal de referencia permite generar los estados de los Switch para cada nivel de voltaje de salida.

Conexión entre Gate Drives y módulos IGBT de la celda SINAMICS:

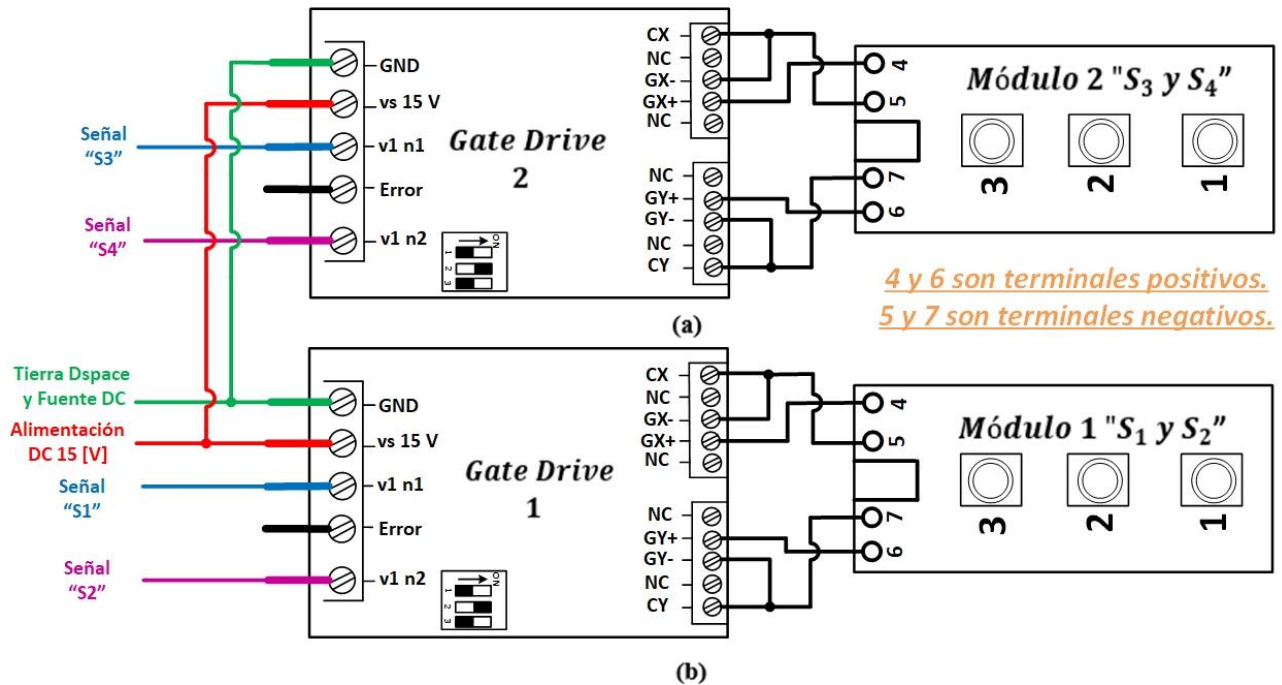


Fig. 3-A Conexión entre Gate Drives e IGBT.

(a) Drive 2 y módulo 2, (b) Drive 1 y módulo 1.

Como se mencionó anteriormente los pulsos de disparo son enviados a los Gate Drives como se muestra en la Fig. 3-A, S_1 y S_2 para el Drive 1 a las entradas $v1\ n1$ y $v1\ n2$ respectivamente, posterior a esto los disparos de S_1 ingresan por los terminales 4 y 5 del módulo 1, cabe destacar que es necesario puentear CX y $-GX$ que ingresan al terminal 5 y la salida $GY+$ va al 4 directamente. Para el caso de S_2 ingresa por 6 y 7 del mismo módulo, donde $GY-$ y CY se puentean para ingresar al terminal negativo que va hacia 7, y por último $GY+$ va hacia el 6. De esta forma se cuenta con el control de los Switch S_1 y S_2 del primer módulo.

Para el Gate Drive 2 se sigue el procedimiento anterior, con la diferencia que los terminales $v1\ n1$ y $v1\ n2$ corresponden a las entrada de pulsos para los Switch S_3 y S_4 , la salida hacia el módulo 2 sigue la misma lógica descrita anteriormente. Los disparos de S_3 ingresa a los terminales 4 y 5, mientras que S_4 al 6 y 7.

La alimentación de los Drives se realiza mediante una fuente de alimentación DC de 15 [V] como se muestra en la líneas rojas de la Fig. 3-A, además, es necesario conectar las tierras tanto de la Dspace como de la fuente DC a ambos Drives como se destaca en líneas verdes de dicha figura.

Conexión entre módulos IGBT y dispositivos:

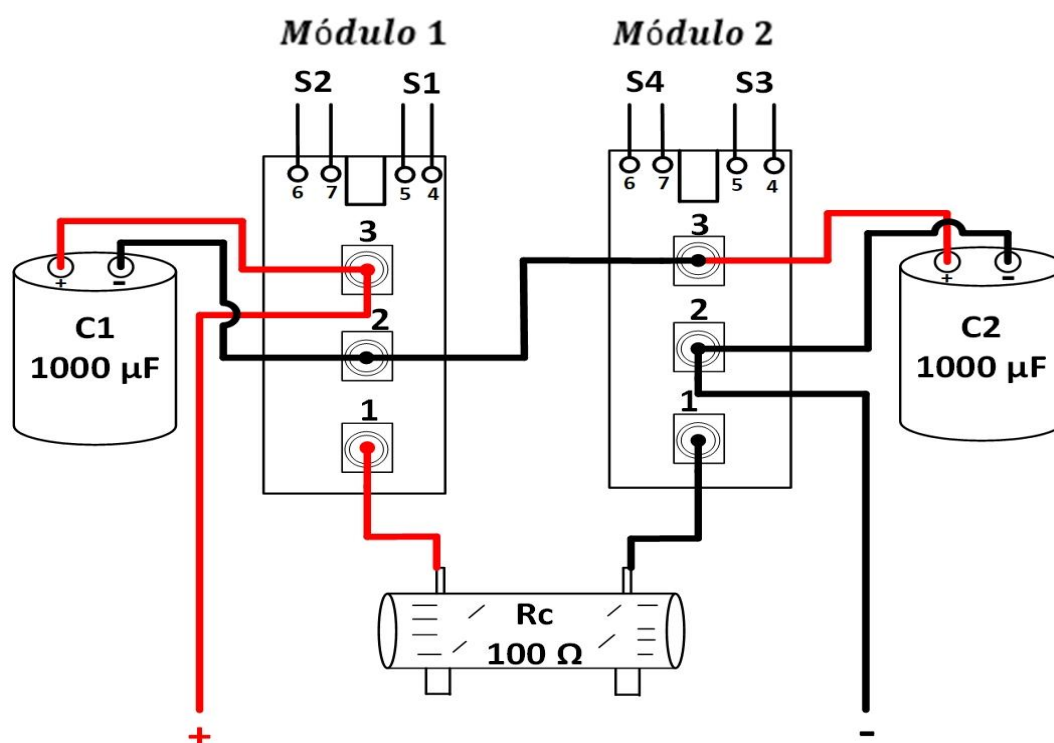


Fig. 4-A Conexión entre módulos IGBT y dispositivos.

Mediante los terminales externos (3, 2 y 1) de los módulos IGBT se procede a la conexión entre ambos, en la parte superior ingresan los pulsos de disparo de los Switch respectivos, el módulo 1 y 2 se conectan del terminal 2 hacia el 3 como se muestra en la Fig. 4-A, el positivo de los condensadores C_1 y C_2 va hacia los terminales 3 y el negativo hacia el 2, la resistencia de carga R_c va conectada en los puntos 1 de cada submódulo. Finalmente, la alimentación DC del Setup se realiza con el positivo hacia el terminal 3 y el negativo al 2 como se muestra en la figura mencionada.

Modelo general del Setup implementado de forma experimental celda SINAMICS:

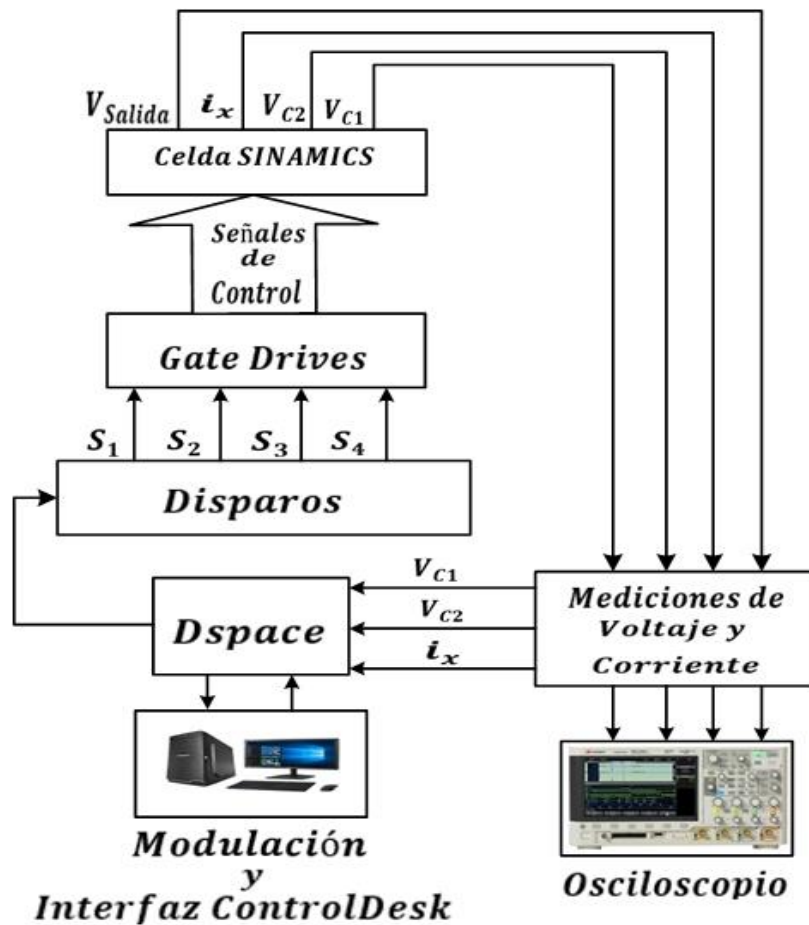


Fig. 5-A Esquema general implementado.

En la Fig. 5-A se ilustra un esquema general del Setup con el fin de poder comprender de mejor forma el proceso de validación de la topología de celda SINAMICS, en la cual se utilizaron equipos e instrumentos descritos en la Tabla 1-6.1 y los parámetros numéricos presentados en la Tabla 1-A, las mediciones de voltaje y corrientes se obtienen directamente de desde el osciloscopio una vez puesto en marcha la simulación de la interfaz del **ControlDesk**.

El Setup de la celda implementada de forma experimental se muestra en la Fig. 6-A, el cual sigue la configuración del esquema visto anteriormente en donde se muestran los equipos e instrumentos utilizados para la construcción de dicho modelo.

Setup de la celda SINAMICS realizado en LEPA 1:

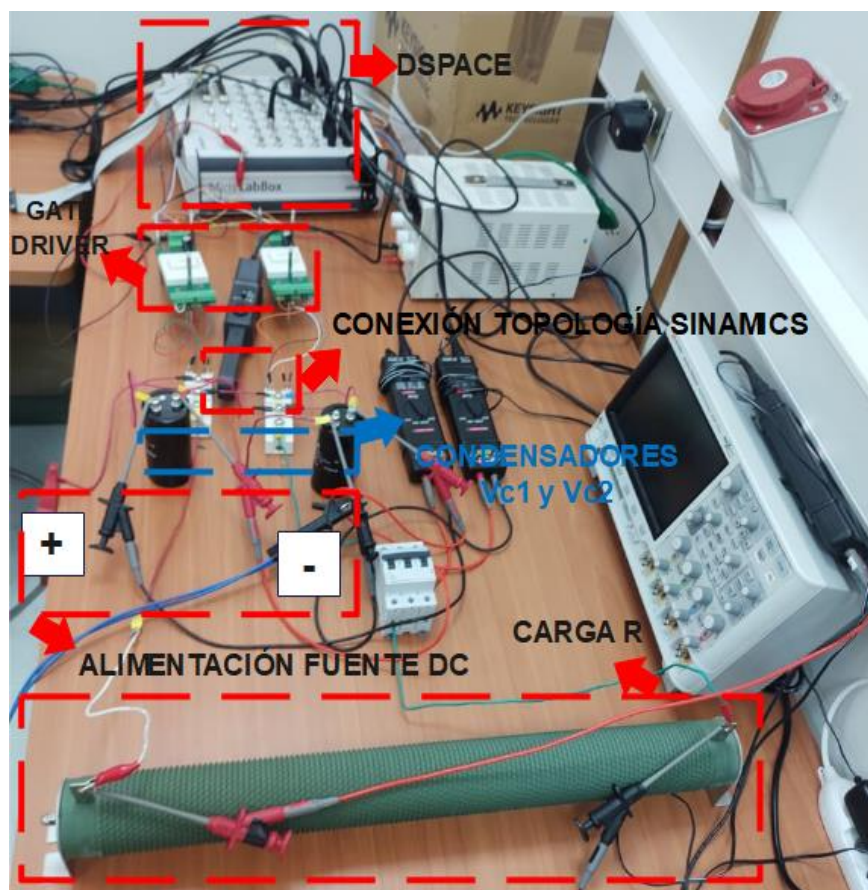


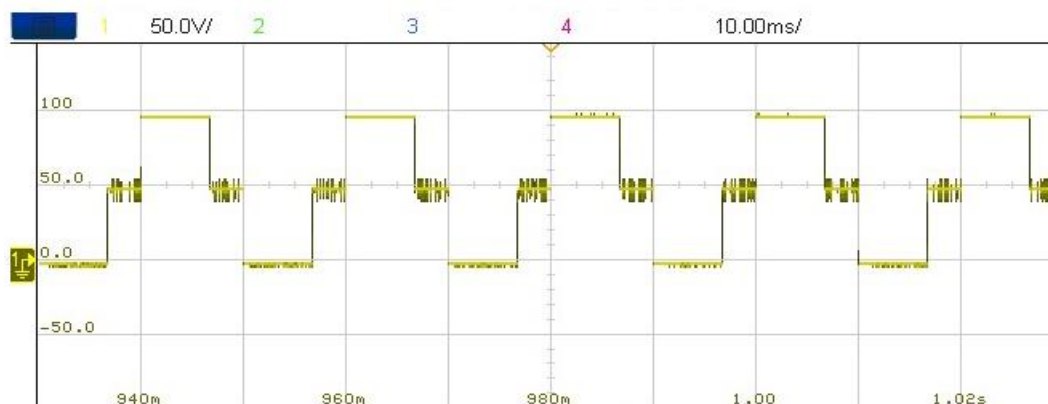
Fig. 6-A Setup de la celda SINAMICS realizado en LEPA 1.

En la Fig. 6-A, se muestra el Setup implementado en el laboratorio de LEPA 1 para la validación de la celda SINAMICS en la cual se muestran los equipos e instrumentos utilizados para dicho proceso. Cabe destacar que se realizaron pruebas con y sin carga R , lo cual se realiza mediante la desconexión de esta haciendo uso de Switch incorporado en el modelo. Los resultados de dicho procedimiento se exhiben a continuación.

Formas de onda de Voltaje V_{Salida} :



(a)



(b)

Fig. 7-A Voltaje de salida de la celda SINAMICS.

(a) Con carga R, (b) Sin carga R.

En la Fig. 7-A (a), se presenta el voltaje de salida (V_{Salida}) de la celda SINAMICS considerando una resistencia de carga $R_c = 100 [\Omega]$, la figura respectiva fue obtenida directamente desde el osciloscopio en la cual se puede observar los tres niveles de voltaje esperados 0, 50 y 100 [V] respectivamente, cabe destacar que la escala en el eje “Y” corresponde a 50 [V/div].

En la Figura 7-A (b), se desconectó la carga R_c mediante un Switch, luego se procedió a medir el voltaje de salida en el osciloscopio, como resultado de esto de igual forma se ven los tres niveles de voltaje esperados, pero con la diferencia en que la forma de onda de voltaje posee una distorsión o ruido menor cuando se genera el nivel 1 (50 [V]).

La presencia de ruido al generar este nivel respectivo se atribuye al tiempo de muestreo del modelo de control desarrollado en Simulink, el cual excede la capacidad de procesamiento del osciloscopio. Como resultado, al ser muestreada la señal en este, no logra hacerlo a la velocidad prevista. Para abordar esta problemática, se podría contemplar la inclusión de un bloque **Rate Transition** en el esquema de control de Simulink. Este componente permitiría la transferencia de datos desde la salida del bloque operativo, adaptándolos a la velocidad requerida por el sistema de entrada.

Es importante destacar que, en el contexto de esta situación particular, la implementación de dicha solución no resultó necesaria. La forma de onda obtenida proporciona una validación suficiente de los resultados.

Forma de onda de corriente i_x .

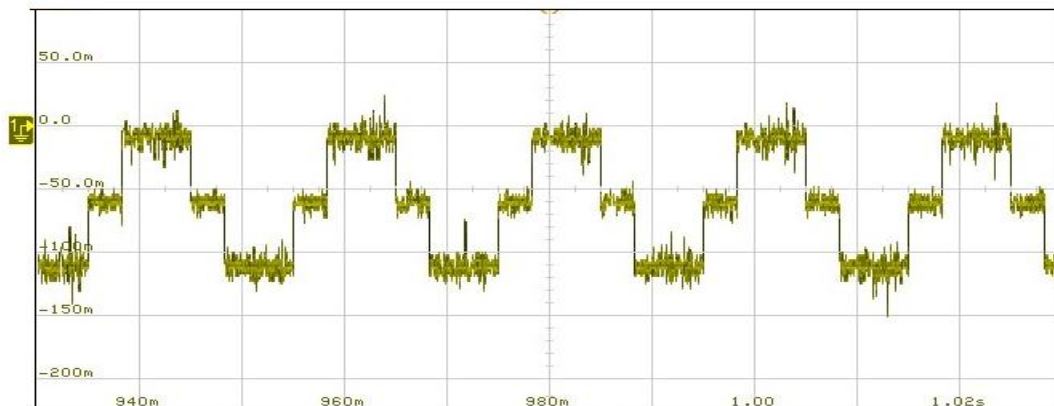
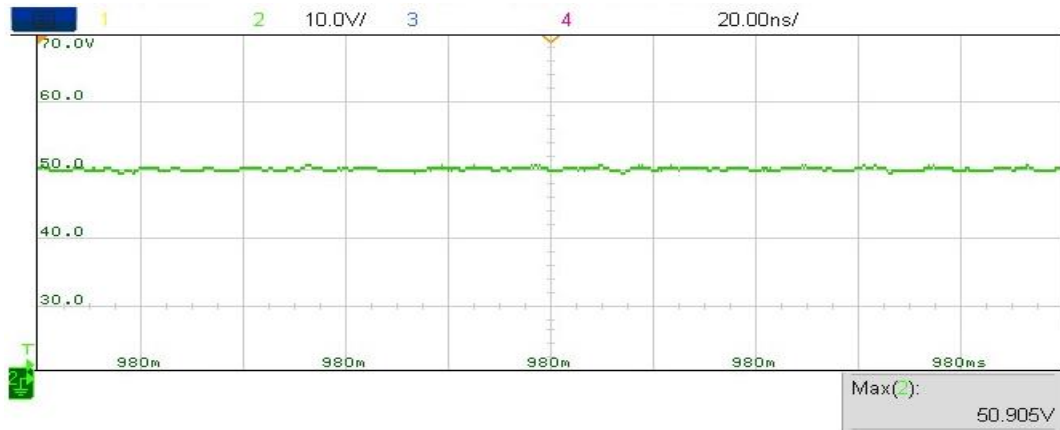


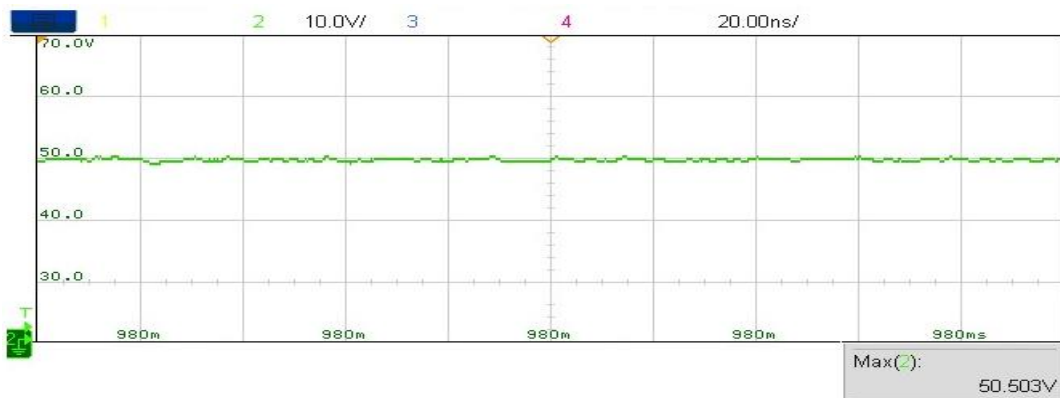
Fig. 8-A Corriente i_x de la celda SINAMICS.

La Figura 8-A, muestra la corriente i_x a través del módulo con una resistencia de carga donde se puede observar que la forma de onda es la esperada de $100 \text{ [mA]} = 1 \text{ [A]}$ para el caso en que ambos condensadores se encuentran activos, $50 \text{ [mA]} = 0.5 \text{ [A]}$ cuando solo uno conduce y $0 \text{ [mA]} = 0 \text{ [A]}$ cuando ninguno conduce. Cabe destacar que en esta medición el sensor de corriente se encuentra en dirección opuesta al sentido en que circula dicha corriente, por lo que la forma de onda se encuentra hacia el negativo del eje “Y” siendo solo la dirección de esta, por lo que la corriente es la misma.

Formas de onda de voltaje de los condensadores V_{C1} y V_{C2} :



(a)



(b)

Fig. 9-A Voltaje en los condensadores de la celda SINAMICS.

(a) Condensador V_{C1} , (b) Condensador V_{C2} .

Los valores de voltaje en los condensadores de la Fig. 9-A, fueron obtenidos directamente del osciloscopio. Se observa un equilibrado efectivo entre estos voltajes, con una diferencia de aproximadamente $0.402[V]$ entre ambos condensadores. Esta discrepancia resulta despreciable dada la magnitud del voltaje de operación. Además, los voltajes alcanzan un valor DC de $50[V]$, lo cual es esperable ya que el voltaje de la fuente se ha fijado en $100[V]$.

Finalmente, los resultados obtenidos confirman que mediante la estrategia de control presentada y el tipo de celdas utilizadas es posible mantener un equilibrio efectivo entre los condensadores de dicho modelo.

Anexo B. Dspace e interfaz ControlDesk

La plataforma Dspace MicroLabBox constituye una solución integral y sofisticada para el monitoreo y control en tiempo real de sistemas de potencia. Este dispositivo de alta precisión está dotado de una amplia capacidad de adquisición y control de señales, evidenciada por su configuración de 34 canales de entrada analógica, 16 canales de salida analógica y 72 canales de entrada/salida digital. Estas características técnicas confieren a la MicroLabBox una versatilidad y potencia excepcionales en el ámbito de la instrumentación y control de sistemas. está compuesta por un FPGA programada y configurado para recibir señales análogo/digital, y por medio de Matlab-Simulink es posible dicho procesamiento.

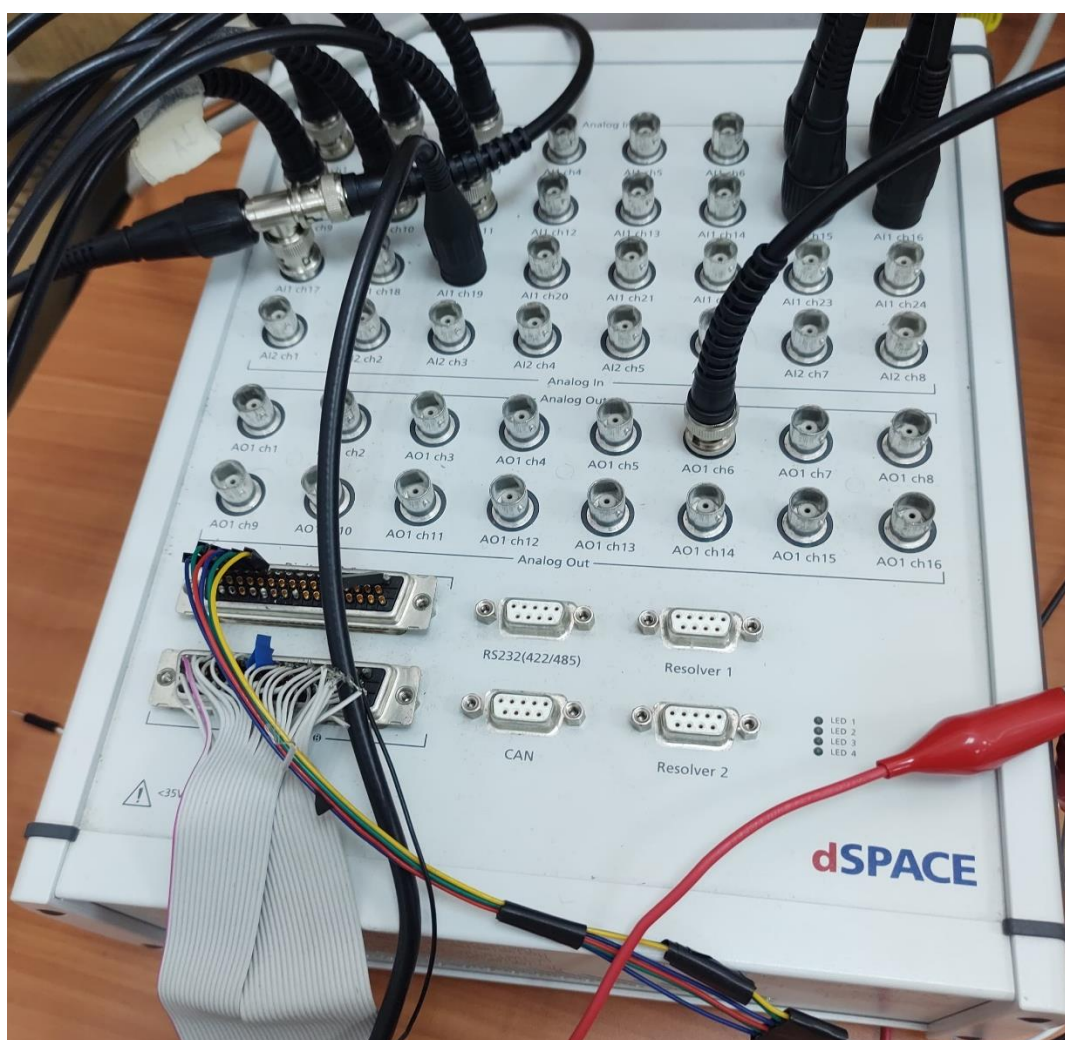


Fig. 1-B Dspace con sus respectivos canales de entradas y salidas.

Los bloques que entrega Simulink para la comunicación con la Dspace son necesarios para la ejecución del proyectos de investigación de tesis, estos bloques son los siguientes.

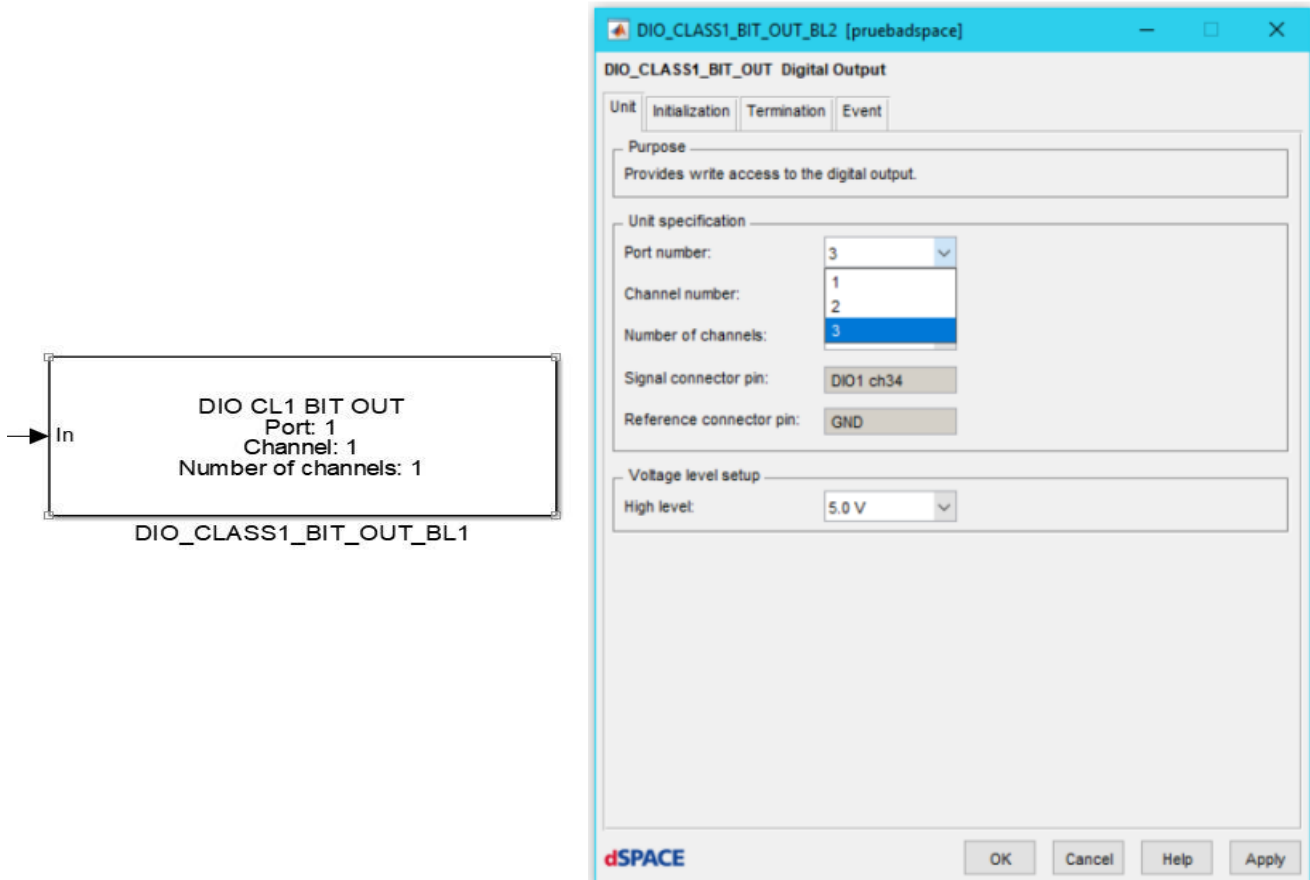


Fig. 2-B Bloques utilizados para procesamiento de señales de salidas digitales.

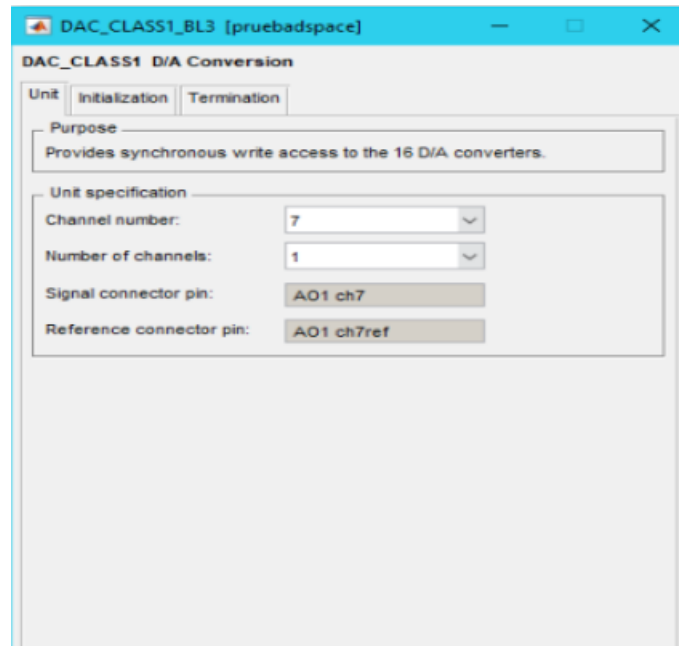
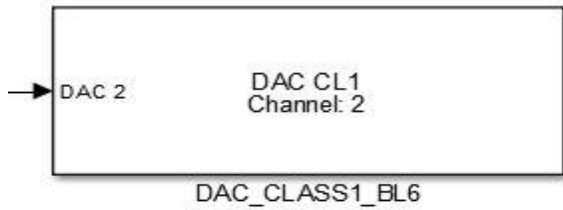


Fig. 3-B Bloques utilizados para procesamiento de señales de salidas analógica.

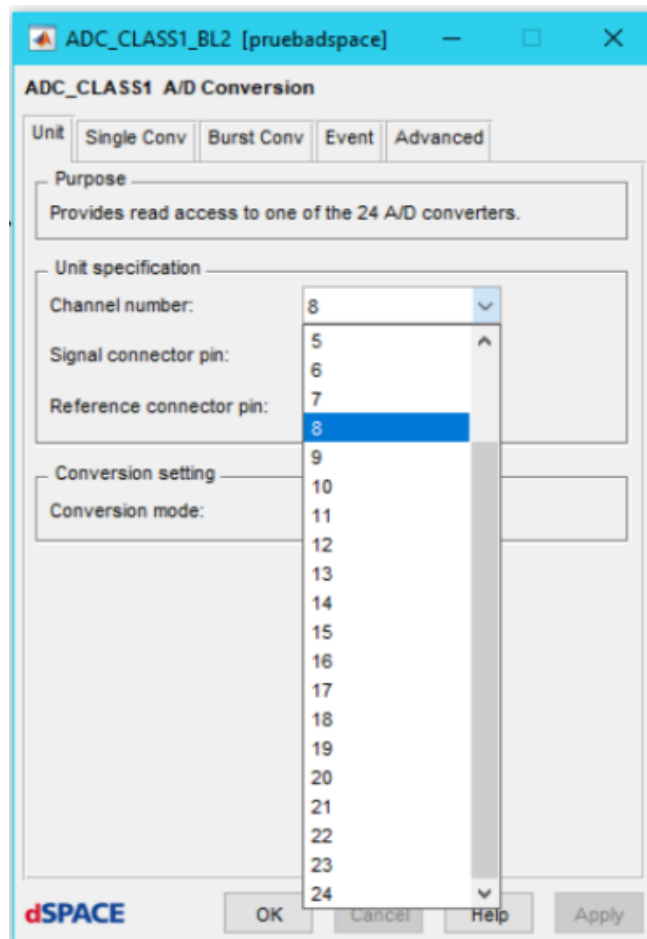
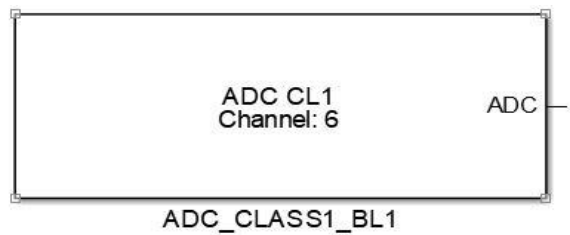


Fig. 4-B Bloques utilizados para procesamiento de señales de entrada analógica.

El bloque de Salida Digital (DIO) es responsable del control de la conmutación de estados digitales y puede ser configurado para proporcionar salidas digitales con voltajes ajustables en un rango comprendido entre 2.5 y 5 [V]. Una aplicación práctica ilustrativa de este sistema implica la medición de señales analógicas provenientes de sensores a través de los canales de entrada analógica, estas señales son posteriormente convertidas a su forma digital mediante el bloque de Conversión Analógico-Digital (ADC).

Con el propósito de visualizar el resultado de estas operaciones, las señales digitales pueden ser reconvertidas a su forma analógica mediante el bloque de Conversión Digital-Analógico (DAC). Subsecuentemente, estas señales pueden ser observadas en dispositivos externos, tales como un osciloscopio, a través de las salidas proporcionadas por la MicroLabBox.

El dominio de estos bloques funcionales es fundamental para la implementación efectiva de sistemas que se está desarrollando. Una vez que se ha llevado a cabo la configuración de los bloques pertinentes y se ha desarrollado el algoritmo correspondiente en el entorno Simulink, existe la posibilidad de exportar el modelo completo a un archivo con extensión .sdf mediante la utilización de la función BUILD MODEL. Subsecuentemente, este archivo .sdf puede ser transferido e implementado en la plataforma MicroLabBox a través de la interfaz proporcionada por el software ControlDesk.

Exportación hacia ControlDesk:

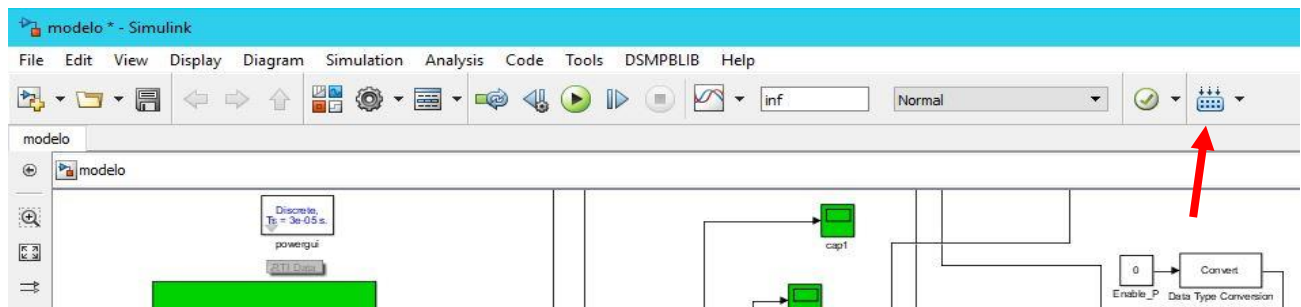


Fig. 5-B Exportar simulación hacia ControlDesk.

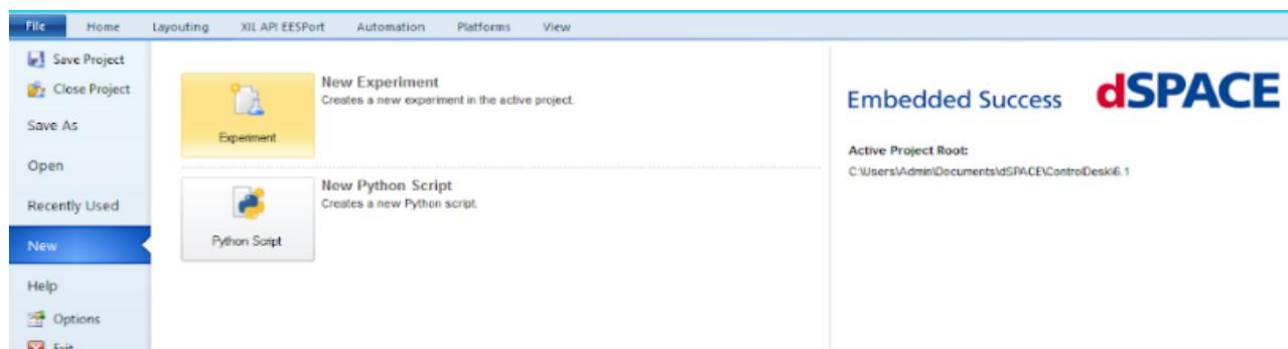


Fig. 6-B Etapa de incorporar archivo .sdf en ControlDesk.

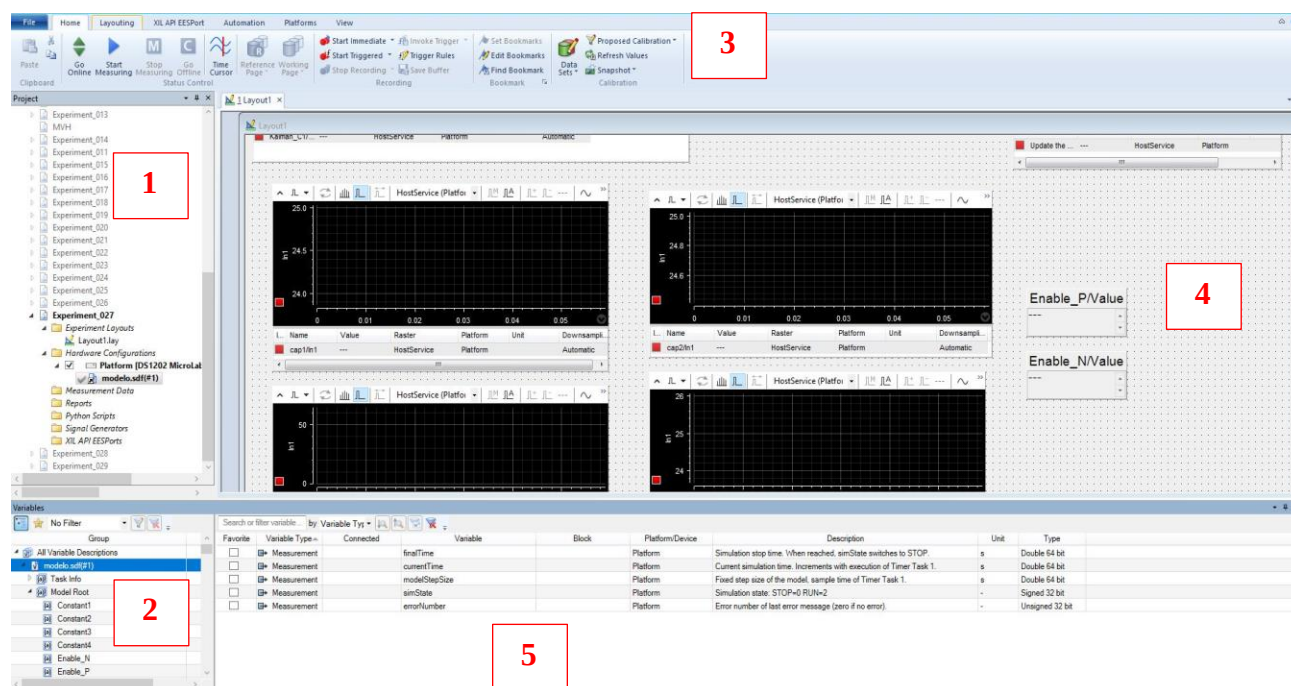


Fig. 7-B interfaz ControlDesk.

Número 1.

En la ventana referente al número 1, se muestran los proyectos que actualmente se encuentran en ejecución los cuales fueron implementados en Matlab-Simulink, una vez cargados a dicha área de trabajo. Para este trabajo se cuenta con el proyecto Experiment_027 en el cual se encuentra alojado el archivo con los parámetros de la simulación.

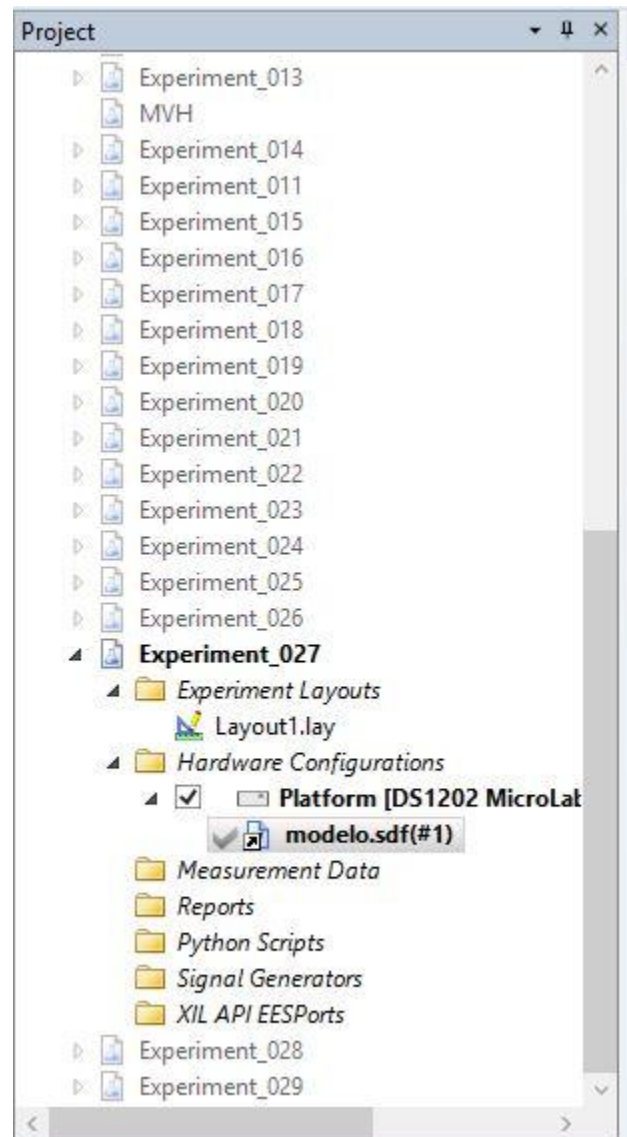


Fig. 8-B Proyectos ControlDesk.

Número 2.

Para este caso se tiene la ventana en donde es posible acceder a los variables que fueron definidas en Matlab-Simulink, donde la variable de interés se selecciona y se arrastra hacia la ventana de trabajo para ser analizada en tiempo real.

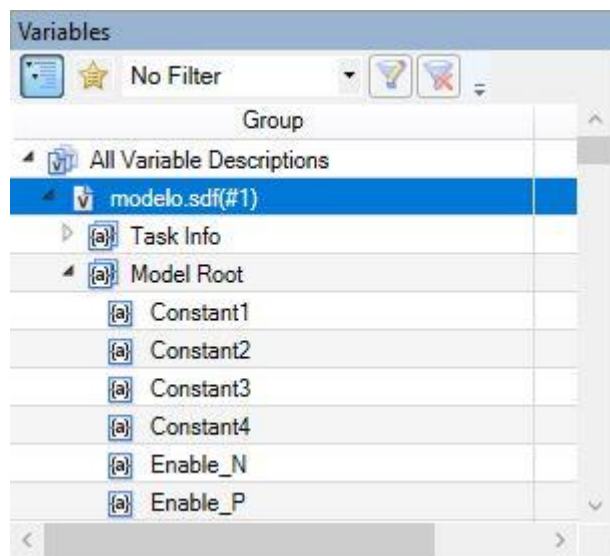


Fig. 9-B Variables ControlDesk.

Número 3.

En esta sección se accede a los menús del Software ControlDesk, donde destacan los botones de **“Go Online”** el cual activa la simulación manteniéndola en línea con la MicroLabBox, el siguiente corresponde al de **“Star Measuring”** donde se pone en marcha la simulación, **“Stop Measuring”** se detiene la simulación y finalmente **“Go Offline”** que se desconecta la simulación quedando fuera de línea.



Fig. 10-B Menú ControlDesk.

Número 4.

En esta parte se muestra el área de trabajo donde se arrastran las variables que se desean observar, ya sea formas de ondas provenientes de señales eléctricas o variables del tipo **“Numeric input”** Para visualizar.

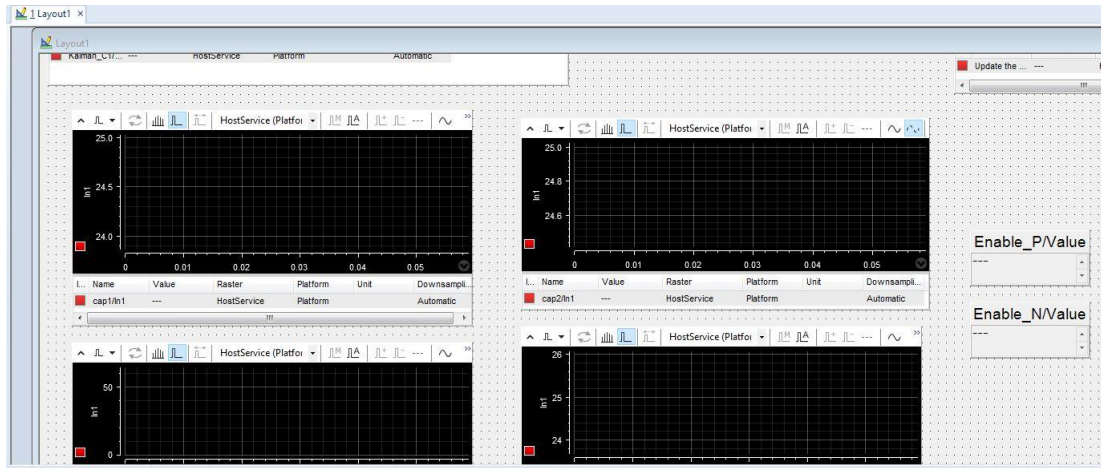


Fig. 11-B Área de trabajo ControlDesk.

Número 5.

Finalmente, se muestra la ventana en la cual se observa información de algunos tipos de variables que genera la plataforma ControlDesk.

Search or filter variable ... by Variable Type								
Favorite	Variable Type	Connected	Variable	Block	Platform/Device	Description	Unit	Type
☐	Measurement		finalTime		Platform	Simulation stop time. When reached, simState switches to STOP.	s	Double 64 bit
☐	Measurement		currentTime		Platform	Current simulation time. Increments with execution of Timer Task 1.	s	Double 64 bit
☐	Measurement		modelStepSize		Platform	Fixed step size of the model, sample time of Timer Task 1.	s	Double 64 bit
☐	Measurement		simState		Platform	Simulation state: STOP=0 RUN=2	-	Signed 32 bit
☐	Measurement		errorNumber		Platform	Error number of last error message (zero if no error).	-	Unsigned 32 bit

Fig. 12-B Información de variables ControlDesk.