

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL ELÉCTRICA



UCSC

Convertidor Hexagonal Multinivel con topología MMSPC

Felipe Andrés Barrera Haro

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

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Profesores Guía:
Dr. Samuel A. Vergara R.
Mg. Ricardo I. León C.

Concepción, Noviembre 2023

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de ingeniería eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Convertidor Hexagonal Multinivel con topología MMSPC

Felipe Andrés Barrera Haro

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Noviembre 2023

Resumen

Desde el punto de vista internacional, Chile es un país donde abundan los recursos para la generación renovable de energías eléctricas, esto debido a que en el sur de país existen los mejores vientos del mundo para la generación eólica, en términos de capacidad instalada por habitante y, en su contraparte, en el norte del país, está presente el mayor flujo de sol para la generación fotovoltaica [1]. Esto acompañado de un buen desempeño en la academia y políticas nacionales ubica, a Chile en un lugar privilegiado para inversiones internacionales.

Acompañado de la generación eléctrica Chile avanza con una mirada firme hacia la electromovilidad aplicando políticas nacionales ambiciosas, con el fin de robustecer la matriz energética, para que al año 2050 el país cuente con un número importante de vehículos eléctricos circulando desde el extremo sur del país hasta el extremo norte, contando con la tecnología de electrolineras en cada uno de los puntos del país.

Este trabajo busca introducir una nueva topología, con el fin de generar un nuevo camino para la carga de vehículos eléctricos mediante convertidores multiniveles. En primer lugar, se definió la estructura del sistema, optando por un modelo hexagonal, en segundo lugar, se definieron los modelos matemáticos y el comportamiento interno de la rama convertidora, en tercer lugar, se llevó a cabo el modelo del sistema en el software Matlab/Simulink®, en cuarto lugar, se definió el modelo de control para el sistema hexagonal y, finalmente se presentan los primeros resultados respecto a este tipo de tipología.

El sistema hexagonal fue aplicado a tres pruebas diferentes para obtener resultados respecto al comportamiento de las baterías internas del sistema. La primera prueba fue aplicar una resistencia constante en el tiempo, la segunda prueba fue variar el valor de la carga y la tercera prueba fue generar una variación en las tensiones de salida de cada fase del convertidor. Para los tres casos se estudió el estado de carga (SOC) en cada una de sus baterías con el fin de conocer si las baterías se descargan de manera lineal o no lineal.

*“Insistir, persistir, resistir y
nunca desistir” Neil
Armstrong*

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría empezar agradeciendo a Marisol I. Haro L., mi madre, quien me acompañó en los buenos y malos momentos con un cariño incondicional. Agradecerle por ser siempre mi cable a tierra.

En segundo lugar, quiero agradecer a Héctor F. Barrera L., mi padre de quien aprendí que con esfuerzo y perseverancia se llega a cualquier destino, sin importar lo oscuro que se vea el camino.

En tercer lugar, me gustaría agradecerles a María A. Lagos A. y a Santiago S. Haro P., mis tatas, quienes siempre tuvieron un espacio en su hogar para mí, entregándome compañía, motivación y una comida de hogar después de la semana en la universidad.

En cuarto lugar, me gustaría agradecer a mi pareja Camila W. quien me acompañó durante todos los años en la universidad, siendo mi pañuelo de lágrimas y una inspiración cada día.

En quinto lugar, me gustaría agradecer a mi profesor guía el Dr. Ricardo Lizana, quien fue parte importante en esta etapa y siempre tuvo las puertas de la oficina abierta cuando existió algún problema.

En quinto lugar, me gustaría agradecer a mis amigos de la universidad, con quienes formé lazos muy importantes Juan C., Ittan T., Vanessa B. Cristóbal O., muchas gracias por los buenos momentos y por las risas que nunca faltaron.

En sexto lugar me gustaría agradecer a mis compañeros de carrera por cada uno de los recuerdos que me llevo de esta etapa, en especial a los que me acompañaron Juan J., María V., Sebastián B., Diego M., Diego B. y Guillermo G.

Finalmente, me gustaría agradecer a la Dirección de Investigación de la UCSC, quienes fueron parte de este proyecto mediante el “Fondo de apoyo a la ejecución de investigación para estudiantes de pregrado”

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
NOMENCLATURA.....	IX
ABREVIACIONES.....	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	2
1.2.1 Estrategia y noticia nacional.....	2
1.2.2 Bibliografía Convertidores MMSPC	3
1.2.3 Bibliografía convertidores Hexagonales	4
1.3. DISCUSIÓN	6
1.4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	7
1.4.1 Hipótesis de Trabajo.....	7
1.4.2 Objetivo General	7
1.4.3 Objetivos Específicos.....	7
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	8
1.6. METODOLOGÍA.....	8
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A MODULACIÓN MMSPC	9
2.1. INTRODUCCIÓN.....	9
2.2. TIPOS DE INTERCONEXIONES	10
2.2.1 Serie.....	11
2.2.2 Paralelo	11
2.2.3 Bypass.....	11
2.3. DISCUSIÓN	12
2.4. TOPOLOGÍA DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA HEXAGONAL BASADO EN MMSPC.....	13
2.5. MODELO DEL CONVERTIDOR HEXAGONAL CON MMSPC	15
2.5.1 Introducción.....	15
2.5.2 Análisis de sistema de ecuaciones del circuito hexagonal con módulos MMSPC.....	16
2.6. SISTEMA DE CONTROL PARA EL CONVERTIDOR HEXAGONAL.....	20
2.6.1 Sistema de control.....	20
CAPÍTULO 3. PARÁMETROS Y RESULTADOS.....	22
3.1. NÚMERO DE NIVELES DEL CONVERTIDOR MMSPC	22
3.1.1 Fuente de voltaje continuo $V_{DC}=150[V]$	22
3.1.2 Baterías $V_{nom} = 150[V]$	24
3.2. RESULTADO DEL CONVERTIDOR HEXAGONAL BATERÍAS	26
3.2.1 Cargas resistivas constante	26
3.2.2 Variación en la carga	36
3.2.3 Variación de la tensión.....	45
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	53
4.1. CONCLUSIONES	53
4.2. TRABAJO FUTURO	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXO A. SIMULINK	57
A.1. MMSPC	57
A.1.1 CONTROL DE MMSPC	57
A.2. RAMA CON MÓDULOS MMSPC	58

Lista de Tablas

Tabla 1. Estados de conmutación para interconexiones internas	11
Tabla 2. Parámetros de la batería	24
Tabla 3. Parámetros para la simulación del sistema hexagonal con una resistencia constante.....	26
Tabla 4. Parámetros para la simulación del sistema hexagonal con variaciones en la carga.....	36
Tabla 5. Parámetros del convertidor con variación de tensión	45

Lista de Figuras

Fig. 1 Rama del convertidor con módulos MMSPC	9
Fig. 2 Interconexiones externas e internas de semiconductores MMSPC	10
Fig. 3 Estados de conmutación del sistema MMSPC.....	10
Fig. 4 Sistema cerrado con seis puntos de salida	13
Fig. 5 Topología del convertidor hexagonal	14
Fig. 6 Convertidor hexagonal con MMSPC.....	16
Fig. 7 Convertidor hexagonal simplificado (a)Fase A (b) Fase B (c) Fase C	17
Fig. 8 Lazo de control para el sistema hexagonal	20
Fig. 9 Voltaje del convertidor hexagonal con fuente de voltaje continuo.....	23
Fig. 10 Curvas de la batería.....	24
Fig. 11 Voltaje del convertidor hexagonal con baterías	25
Fig. 12 Voltaje en una rama del convertidor. (a) Rama A convertidor (b) Cuatro ciclos de voltaje. 27	
Fig. 13 Voltaje del lado AC del convertido hexagonal con carga constante. (a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C	28
Fig. 14 Corrientes AC del convertidor con carga constante. (a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C.....	29
Fig. 15 Respuesta de los controladores. (a)Fase A (b)Fase B (c)Fase C	30
Fig. 16 Índices de modulación. (a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C.....	31
Fig. 17 Voltaje del lado DC del convertidor. (a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C	32
Fig. 18 Corriente del lado DC del convertidor. (a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C	33
Fig. 19 Estado de carga. (a) SOC ramas 1, 2, 3 (b) SOC ramas 4, 5, 6	34
Fig. 20 Estado de carga (SOC) por batería en las ramas. (a) Rama 1 (b) Rama 2 (c).....	35
Fig. 21 Voltaje de una rama del convertidor	37
Fig. 22 Voltaje lado AC del sistema hexagonal con variación en la carga	38
Fig. 23 Corriente lado AC del sistema hexagonal con variación en la carga.....	39
Fig. 24 Respuesta de los controladores. (a)Fase A(b)Fase B(c)Fase C	40
Fig. 25 Índices de modulación de las fases del convertidor con carga variable (a) índice de modulación con impacto de carga (b)Ciclo de índice de modulación a 600[v].....	41
Fig. 26 Voltaje lado DC del sistema hexagonal con variación en la carga	42
Fig. 27 Corriente DC del convertidor hexagonal	43
Fig. 28 Estado de carga de las ramas del convertidor hexagonal.....	44
Fig. 29 Voltaje del lado AC del convertidor con variación en el voltaje	46
Fig. 30 Corriente de lado AC del convertidor con variación en el voltaje.....	47
Fig. 31 Respuesta de los controladores ante variación en el voltaje de las fases.....	48
Fig. 32 Índices de modulación del convertidor ante variación en el voltaje de las fases.....	49
Fig. 33 Voltaje del lado DC del convertidor ante variación en el voltaje de las fases.....	50
Fig. 34 Corriente del lado DC del convertidor ante variación en el voltaje de las fases.....	51
Fig. 35 Estado de carga (SOC) de las baterías ante variación en el voltaje de las fases. (a)Ramas superiores (b)Ramas inferiores	52

Nomenclatura

V	: Voltaje
A	: Corriente
Ω	: Ohm
V_{Ap-Am}	: Voltaje entre los terminales de salida de la fase A
V_{Bp-Bm}	: Voltaje entre los terminales de salida de la fase B
V_{Cp-Cm}	: Voltaje entre los terminales de salida de la fase C
Va_N	: Voltaje en las ramas de la fase A
Vb_N	: Voltaje en las ramas de la fase B
Vc_N	: Voltaje en las ramas de la fase C
Ia_N	: Corriente en las ramas de la fase A
Ib_N	: Corriente en las ramas de la fase B
Ic_N	: Corriente en las ramas de la fase C
ZI	: Impedancia interna de los módulos
$Soc_{(0)}$	: Estado de carga inicial de las baterías
$Soc_{(t)}$	: Estado de carga en el tiempo t
$r_{load\ 1}$	: Resistencia de carga para la fase A
$r_{load\ 1}$	: Resistencia de carga para la fase B
$r_{load\ 1}$	: Resistencia de carga para la fase C
L_{load}	: Inductancia de carga
r_{int}	: Resistencia interna
L_{int}	: Inductancia interna

Abreviaciones

UCSC	:	Universidad Católica de la Santísima Concepción
P. I	:	Controlador proporcional - integrativo
MMSPC	:	Convertidor multinivel modular serie paralelo
PWM	:	Modulación por ancho de pulso
PS	:	Cambio de fase
N	:	Número de celdas presentes por rama
IGBT	:	Transistor bipolar de puerta aislada
R	:	Resistencia
L	:	Inductancia
AC	:	Corriente alterna
DC	:	Corriente directa

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

La principal preocupación de organizaciones internacionales como la OCDE por medio de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) son los gases de efecto invernadero (GEI), donde un 12% del total mundial proviene del sector de transporte, según la organización mundial de la salud, esto a causa de su combustión mediante combustibles fósiles, ya sea automóviles, camiones, barcos y trenes. Debido a lo anterior Chile, ha generado una estrategia nacional sobre la electromovilidad [2] que se espera que al año 2050 cuente con más de 5 millones de autos eléctricos circulando por sus calles, los que al desplazarse presentan como ventaja no generan GEI.

Producto de la gran cantidad de vehículos eléctricos que se espera tener al año 2050 surge una pregunta ¿Chile cuenta con una red eléctrica para abastecerlos? En este sentido, el país se ha planteado el uso eficiente de la energía, estableciendo metas concretas de reducción de un 20% de la demanda energética proyectada para el año 2025 y se aprobaron decretos que establecen como uno de sus puntos fundamentales mejorar la eficiencia energética de los vehículos y de su operación, sin embargo, actualmente no se cuenta con la red necesaria que permita abastecer dicha cantidad de vehículos eléctricos. Es aquí donde la tecnología de la electrónica de potencia puede jugar un rol, ya que mediante esta tecnología se puede hacer más eficiente la carga de las baterías de los vehículos eléctricos y el robustecimiento de la red eléctrica como el proyecto “Kimal- Lo Aguirre” que consiste en transmisión eléctrica en corriente continua.

El punto desfavorable que deja el aumento de vehículos eléctricos es la gran cantidad de baterías que quedarán en desuso (baterías de segundo ciclo) con el paso de los años, ya que los fabricantes entregan una garantía de batería de entre 8 a 10 años. Esto se espera que mejore al aumentar las tecnologías de fabricación. Además, Chile actualmente cuenta con la ley 20.920, conocida como ley de fomento al reciclaje, la que establece que los productores e importadores de baterías deben tomar responsabilidad sobre los residuos, abriendo de este modo un campo de investigación sobre la reutilización de estos recursos.

En conocimiento de esto, este proyecto busca mediante un convertidor modular multinivel serie paralelo (MMSPC) en configuración hexagonal, generar una estación de carga de baterías que buscar alimentar de energía hasta tres vehículos eléctricos.

En primera instancia el proyecto será de manera simulada, mediante el software Simulink de Matlab, Se simulará la configuración hexagonal con los módulos MMSPC de manera que obtener los tres puntos DC. En una segunda instancia y como trabajo futuro se implementará este tipo de topología utilizando baterías de segundo ciclo.

1.2. Revisión bibliográfica

1.2.1 Estrategia y noticia nacional

- ♣ Ministerio de Energía de Chile. (2021). Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile. Santiago: Ministerio de Energías de Chile. [En línea] Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad_ministerio-de-energia.pdf. [Accedido: 17-oct-2023]

Esta medida busca impulsar la estrategia de movilidad eléctrica en Chile con el fin de cumplir con los compromisos asumidos por el país en relación con el cambio climático. Se espera que la población de vehículos aumente considerablemente para el año 2050, por lo que se pretende evitar que una parte significativa del CO₂ llegue a la atmósfera.

La estrategia nacional propone una visión de los desafíos y metas de la electromovilidad en Chile. Explica y plantea ejes estratégicos relacionados con las regulaciones y estándares, así como estrategias para el transporte público y el fomento de la investigación y desarrollo del capital humano. Concluye con el plan de acción que se pretende aumentar de manera considerable el flujo de autos eléctricos en el país y, por consecuencia, de cargadores para los vehículos.

- ♣ InvestChile.gob.2023, “Chile, el país más atractivo para invertir en energías renovables”. [En línea] Disponible en: <https://blog.investchile.gob.cl/bloges/chile-el-pais-mas-atractivo-para-invertir-en-energias> [Accedido: 17-oct-2023]

Esta noticia se centra sobre el ranking que pone a Chile como uno de los países más atractivos para la inversión en energías limpias según el reporte de ClimateScope, proporcionando datos sobre las condiciones de financiamiento y los mercados emergentes.

1.2.2 Bibliografía Convertidores MMSPC

- ♣ Zhongxi Li; Ricardo Lizana F.; Sha Sha, Zhujun Yu; Angel V. Peterchev and Stefan M. Goetz "Module Implementation and Modulation Strategy for Sensorless Balancing in Modular Multilevel Converters" in IEEE Transactions on Power Electronics (Volume 34, Issue: 9, September 2019)", Doi:10.1109/TPEL.2018.2886147

Este documento propone una nueva variante de módulo serie/paralelo con un inductor de puerto pequeño para suprimir la corriente de equilibrio de cargas en aplicaciones de alta tensión con tasas de conmutación limitada, de igual manera propone un marco de modulación basado en portadoras y muestra la importancia de la asignación de portadoras en términos de eficiencia y equilibrio. El módulo y el método de modulación propuestos se verifican en una configuración de laboratorio con velocidades de conmutación de módulos de hasta 200 Hz. Los resultados experimentales muestran la practicidad y las ventajas de los nuevos módulos en serie/paralelo en aplicaciones de MMC de alta tensión.

- ♣ Christian Korte; Eduard Specht and Marc Hiller "Efficiency evaluation of MMSPC/CHB topologies for automotive applications", in 2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Doi:10.1109/PEDS.2017.8289145

Esta ponencia analiza la evaluación de dos sistemas de topología multinivel con baterías integradas para el uso en vehículos eléctricos. El documento compara la eficiencia de estos sistemas con la de un inversor de dos niveles de última generación y muestra que los convertidores multiniveles integrados en baterías pueden lograr mayor eficiencia, especialmente con una potencia de salida baja. Se incorpora evaluaciones del convertidor y las pérdidas de baterías en un único modelo de sistema completo y se centra en las mejoras en la eficiencia del inversor que se pueden lograr mediante la implementación de módulos MMSPC ya que logran reducir la resistencia de las fases y simplifican el equilibrio de las celdas de convertidor

- ♣ Stefan M. Goetz; Zhongxi Li; Xinyu Liang; Chengduo Zhang; Srdjan M. Lukic and Angel V. Peterchev, "Control of Modular Multilevel Converter with Parallel Connectivity Application

to Battery Systems", in IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 32, Issue: 11, November 2017), Doi: 10.1109/TPEL.2016.2645884

Este artículo presenta un controlador en tiempo real, para un convertidor modular multinivel, capaz de conectar módulos en paralelo, lo que permite precablear las baterías de forma dinámica en varias configuraciones en serie y paralelo, lo que genera una amplia gama de niveles de voltaje de salida. El controlador optimiza las configuraciones del sistema para minimizar las pérdidas por conmutación y conducción, y también la reducción y la sencilla capacidad de balanceo del MMSPC pueden permitir nuevas aplicaciones con voltajes medios y bajos, que se benefician de su salida de alta calidad, la eliminación del magnetismo filtrante, la rápida respuesta y la modulación.

1.2.3 Bibliografía convertidores Hexagonales

- ♣ Lennart Baruschka and Axel Mertens "A New Three-Phase AC/AC Modular Multilevel Converter with Six Branches in Hexagonal Configuration" in IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 49, Issue: 3, May-June 2013), Doi:10.1109/TIA.2013.2252593

Este modelo presenta la topología hexagonal, de manera que se pueden interconectar dos sistemas AC/AC de altos rendimientos, para aplicaciones como turbinas eólicas de baja frecuencia (inferiores a 10 Hz). Este artículo explica el principio de funcionamiento del convertidor y se proporcionan las formas de onda características.

El sistema de conversor que se propuesto en este documento tiene varias ventajas sobre los sistemas de convertidores tradicionales, una de ellas es que presenta una frecuencia de conmutación reducida y menores pérdidas por conmutación, lo que se traduce en una mayor eficiencia y una reducción del estrés térmico del sistema, otra es mejorar la calidad de la forma de onda del voltaje, lo que reduce la distorsión armónica y mejora la calidad de la energía

- ♣ Peng Li; Yachao Wang; Grain Philip Adam; Derrick Holliday and Barry W. Williams. "Three-Phase AC–AC Hexagonal Chopper System with Heterodyne Modulation for Power Flow Control Enhancement" in IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 30, Issue: 10, October 2015), Doi:10.1109/TPEL.2014.2378018

Este artículo propone un sistema de corte de corriente alterna trifásica, para mejorar el control del flujo de energía en la interconexión de varios parques de generación. También presenta desarrollo de una nueva versión de picador hexagonal de corriente alterna modular multinivel (M2AHC), para la escalabilidad en aplicaciones de alta frecuencia. Está diseñado para ofrecer escalabilidad en aplicaciones de alto voltaje y funciona en modo de casi dos niveles, para suprimir la interferencia electromagnética, causada por la conmutación de alta tensión. El M2AHC utiliza celda de medio puente (con conmutación bidireccional) y no contiene ningún elemento almacenador de energía importante, lo que lo hace más eficiente que otro sistema de corte.

- ♣ Pan Wang; Fei Liu; Xiaoming Zha; Jinwu Gong; Feiyang Zhu and Xiaoqi Xiong, "A Regenerative Hexagonal-Cascaded Multilevel Converter for Two-Motor Asynchronous Drive" in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (Volume: 5, Issue: 4, December 2017), Doi: 10.1109/JESTPE.2017.2713043

Este artículo presenta un convertidor multinivel hexagonal en cascada, para aplicaciones de accionamiento asincrónico de dos motores. Este convertidor tiene dos puertos de entrada y dos puertos de salida, lo que permite enviar diferentes comandos de control a cada motor. Este artículo explica cómo se distribuye la energía entre las seis ramas del convertidor, que equivalen a dos fuentes de voltaje trifásicas. Esto permite que la energía de un motor se utilice para alimentar el otro motor, lo que reduce la necesidad de un sistema almacenador de energía y suprime el sobrevoltaje del enlace de corriente continua.

Presenta resultados experimentales y de simulación para demostrar la eficiencia del sistema de accionamiento del motor propuesto y las estrategias del control.

- ♣ Aitor Laka; Jon Andoni Barrena; Javier Chivite-Zabalza; Miguel Ángel Rodríguez Vidal and Pedro Izurza-Moreno, "New Hexagonal Three-Phase Voltage-Source Converter Topology for High-Power Applications", in IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 62, Issue: 1, January 2015), Doi: 10.1109/TIE.2014.2327597

Este artículo presenta una topología de convertidor de fuente de voltaje (VSC) para aplicaciones de alta potencia, que cambian tres convertidores trifásicos con buses de corriente aislado.

La topología propuesta se puede implementar mediante convertidores trifásicos de dos o varios niveles. Este artículo también valida el buen desempeño de la topología VSC, propuesta mediante dos técnicas de modulación: La modulación de ancho de pulso, portador de desplazamiento de fase (PSCPWM) y, la modulación por eliminación selectiva de armónicos (SHE). La topología del VSC es la herramienta de simulación y los resultados se han validado experimentalmente en un banco de pruebas de 60kVA.

Como resultado en este artículo se tiene que la topología de VSC, propuesta para aplicaciones de alta potencia, que combina tres convertidores trifásicos con buses de corriente continua aislados, es una opción viable para lograr un VSC con tres veces más potencia en cada convertidor trifásico.

- ♣ Chong Zhang; Daozhuo Jiang; Xuan Zhang; Jiayi Chen; Chuang Ruan and Yiqiao Liang, "The Study of a Battery Energy Storage System Based on the Hexagonal Modular Multilevel Direct AC/AC Converter (Hexverter)" in: IEEE Access (Volume: 6), Doi: 10.1109/ACCESS.2018.2854843

Este documento describe el estudio de un sistema de almacenamiento de energía en baterías, basado en convertidores CA/CA directo multinivel modular hexagonal. Este artículo se centra en el desarrollo de un método de control para equilibrar el estado de carga de las unidades de batería. Se analizan y simulan la estructura del sistema y el principio de funcionamiento del convertidor hexagonal multinivel y, se desarrolla un modelo matemático del submódulo de almacenamiento de energía. Se propone una estrategia de control de equilibrio del estado de carga, que se realiza mediante el control de las corrientes en los módulos de derivación. La eficiencia de la estrategia de control se verifica en simulación.

1.3. Discusión

El estudio presentado en este documento describe el desarrollo de un modelo de convertidor hexagonal utilizando módulos MMSPC. El convertidor logra un voltaje AC de 15 niveles y un voltaje DC rectificado mediante un puente de diodos. El modelo se implementó de manera simulada y se estudió para diferentes pruebas y diferentes valores de voltaje en cada una de las fases.

El convertidor logra un buen control de voltaje en los terminales de salida. Los resultados obtenidos son comparables a los de otros estudios que han trabajado con convertidores hexagonales con diferentes tecnologías en los módulos.

En conclusión, el estudio presentado en este documento es un paso en el desarrollo de convertidores hexagonales utilizando módulos MMSPC. Debido a que los resultados obtenidos son prometedores y sugieren que los convertidores hexagonales son una opción viable para aplicaciones de alta potencia.

1.4. Definición del problema

Este proyecto busca introducir de manera simulada una nueva topología para un sistema de carga de vehículos eléctricos con tres puntos de carga desacoplados entre sí, utilizando convertidores multiniveles del tipo serie paralelo, esto mediante un sistema aislado de la red, el cual funciona a base de baterías introducidas en cada uno de los módulos.

1.4.1 Hipótesis de Trabajo.

Mediante el estudio y simulación de un convertidor hexagonal con módulos MMSPC que posee sistema de almacenamiento de baterías y aislado de la red, se puede generar tres puntos de carga DC

1.4.2 Objetivo General

- ✓ Estudiar y simular un convertidor hexagonal multinivel para aplicaciones orientadas a electromovilidad.

1.4.3 Objetivos Específicos

- ✓ Estudio y análisis del sistema hexagonal.
- ✓ Aplicación de módulos MMSPC en el sistema hexagonal.
- ✓ Simulación convertidora hexagonal con módulos MMSPC con operación con carga balanceada y desbalanceada

- ✓ Resultados de operación de un convertidor hexagonal para variación de voltaje en los terminales de carga DC

1.5. Alcances y Limitaciones

Con este trabajo se busca desarrollar habilidades de simulación y conceptuales de convertidores multiniveles y sistemas avanzados de electrónica de potencia, tales como convertidores MMSPC, de manera de llegar a la implementación de manera simulada de un convertidor hexagonal con tres salidas DC desacopladas.

La implementación física del tema de tesis no está contemplada dentro de la propuesta, ya que no es afín al objetivo general y específicos del tema abordado.

1.6. Metodología

El propósito del presente trabajo es generar, con base en un conjunto de módulos MMSPC un convertidor de tipo hexagonal que pueda funcionar como un cargador de vehículos eléctricos basado en baterías, que posea tres puntos de carga desacoplados entre sí, con el objetivo de aumentar la cantidad de puntos de carga para vehículos eléctricos y hacerlo de una manera más sostenible con el medio ambiente.

Se realiza un estudio del estado del arte de los convertidores hexagonales con diferentes tipos de módulos, los que dentro de su topología incluyen el uso de baterías. Convertidores Matriciales (MC) [7], Convertidor Robicon [5], Convertidores de Conmutación Vectorial (VeSc) [7], Convertidor Multinivel en Cascada (CHB) [8], Convertidores de Fuente de Voltaje (VSC) [9] y topología MMSPC/CHB en autos eléctricos [4]

La revisión de los diferentes tipos de convertidores se lleva a cabo con el fin de estudiar modelos matemáticos que permitan comprender las variables internas y externas de los convertidores hexagonales, para luego realizar estrategias de control que logren una correcta estabilidad en la operación del convertidor con módulos MMSPC.

Basado en la revisión bibliográfica, se realizarán simulaciones con el propósito de obtener resultados sobre el comportamiento de la topología hexagonal de módulos MMSPC

Capítulo 2. Introducción a modulación MMSPC

2.1. Introducción

Los convertidores multiniveles serie paralelo, son fundamentales para asegurar la estabilidad y confiabilidad de un sistema, ya que los convertidores MMSPC están formados por la conexión en paralelo de dos puentes tipo H, sumando así un total de ocho semiconductores (IGBT o MOSFET) por módulo. Cada módulo MMSPC cuenta con un elemento almacenador de energía (Condensadores, fuentes DC o baterías). La conexión entre módulos MMSPC se conoce como “interconexión”, la que puede tomar los siguientes estados: Serie (+), Serie (-), Paralelo (+), Paralelo (-), Bypass (+) y Bypass (-). En la Fig.1 se presenta una rama del convertidor que cuenta con tres módulos MMSPC

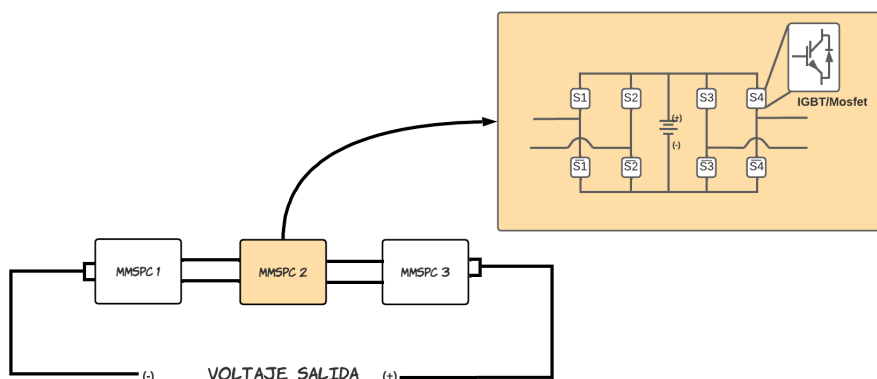


Fig. 1 Rama del convertidor con módulos MMSPC

Fuente: Elaboración propia

La modulación que utiliza una rama de MMSPC es del tipo PS-PWM y esta se aplica en cada una de la intersección del sistema. Para entender la modulación es importante tener en cuenta que posee tres señales fundamentales: portadora, triangular y triangular inversa. Estas señales permiten conocer el estado en el que se encuentran cada uno de los semiconductores del módulo MMSPC.

Una rama del convertidor está formada por 3 módulos MMSPC, los que indican la cantidad de interconexiones que existen. Se puede encontrar dos tipos de interconexiones, por un lado, las internas

que controlan los módulos internos y, por otro lado, las externas, que controlan los extremos del convertidor. Esto queda reflejado de manera gráfica en la Fig. 2, donde, de color verde se aprecian las interconexiones internas y, de color amarillo, la interconexión externa.

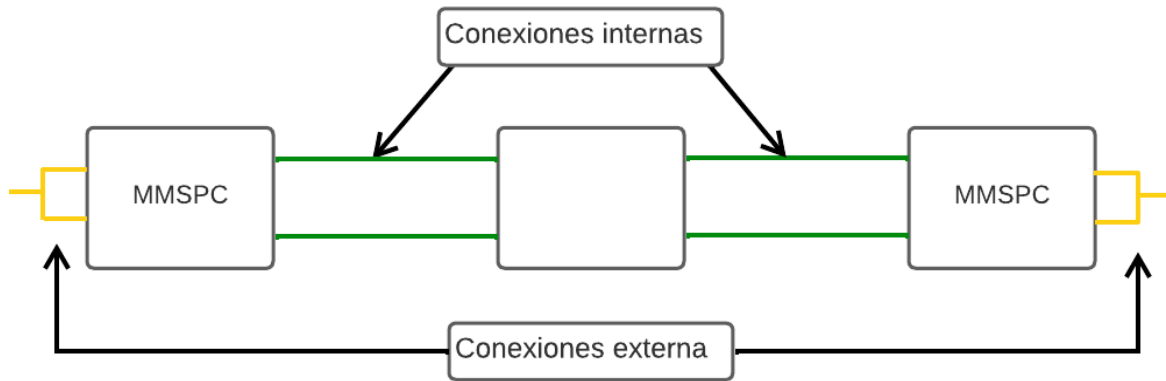


Fig. 2 Interconexiones externas e internas de semiconductores MMSPC

Fuente: Elaboración propia

2.2. Tipos de interconexiones

Los estados posibles de una rama MMSPC son seis. Para saber en qué estado se encuentran es importante conocer, en primer lugar, la señal sinusoidal (Moduladora) y dos señales triangulares donde una es la señal positiva y la otra es la señal negada. Estas señales triangulares tienen una frecuencia definida según sea el caso.

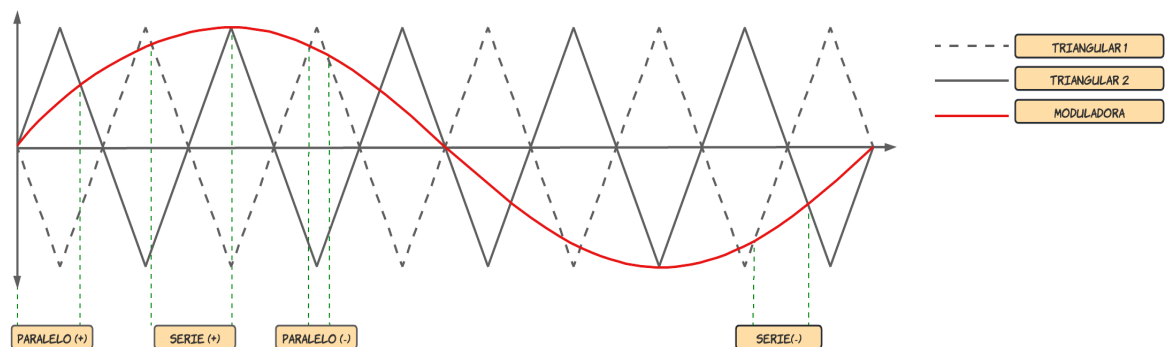


Fig. 3 Estados de conmutación del sistema MMSPC

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 2.1 muestra los diferentes estados de conmutación que pueden tener las interconexiones internas de una rama con módulo MMSPC.

Tabla 2.1. Estados de conmutación para interconexiones internas

Estado de conmutación	Configuración
Serie (+)	Si $M_A > T_1$ & Si $M_A > T_{1N}$
Serie (-)	Si $M_A < T_1$ & Si $M_A < T_{1N}$
Paralelo (+)	Si $M_A < T_1$ & Si $M_A > T_{1N}$
Paralelo (-)	Si $M_A > T_1$ & Si $M_A < T_{1N}$

Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Serie

La modulación se encuentra en estado de serie positiva cuando la señal moduladora esta por sobre ambas señales triangulares, en cambio, cuando la señal moduladora se encuentra por debajo de ambas señales triangulares el estado de conmutación es serie negativo.

2.2.2 Paralelo

La modulación se encuentra en estado paralelo cuando la señal moduladora se encuentra entre las señales triangulares. Cuando la señal triangular positiva está en la parte superior se considera como un estado de conmutación paralelo positivo, en cambio cuando la señal triangular negada se encuentra por sobre la modular se encuentra en paralelo negativo. La principal ventaja que proporciona la conexión en paralelo es el equilibrio de tensión del sistema, es importante que esta conexión sea en pequeños deltas de tiempo ya que de lo contrario se generaría que los elementos almacenadores de energía generen temperaturas no deseadas para el sistema, provocando problemas de funcionamiento.

2.2.3 Bypass

Este estado se utiliza principalmente para las interconexiones externas, debido a que en estos casos no se pueden conectar las fuentes de almacenamiento de energía en paralelo, ya que los módulos sufrirían un aumento de temperatura significativo.

2.3. Discusión

Una de las principales ventajas de este tipo de convertidor es que puede pasar pequeños instantes de tiempo en paralelo, evitando que se sobrecalienten los elementos almacenadores de energía, mejorando así la eficiencia de los módulos. Otro de los beneficios de conectar los módulos en paralelo, es que ayuda a lograr mayor redundancia y confiabilidad del sistema, es decir, en caso de que uno de los módulos del sistema falle, los otros módulos pueden suplir la carga y asegurar la continuidad del sistema. Como tercer beneficio se tiene la capacidad de extensión del sistema, lo que es ideal en el caso que se necesite mayor potencia, debido a que no será necesario el dimensionamiento completo del sistema nuevamente, sino que más bien se pueden agregar los módulos necesarios para suplir la nueva necesidad de potencia, de esta manera disminuye los costos de un proyecto futuro. La modulación PS-PWM por su lado, tiene como beneficio la distribución de carga de manera equitativa entre los módulos del convertidor.

Capítulo 3. Topología del convertidor de potencia hexagonal basado en MMSPC

La topología del convertidor de potencia, aplicado en este trabajo, consiste en un sistema hexagonal, compuesto de seis ramas y seis brazos, formando así un sistema cerrado con seis puntos de salida, de los cuales se pueden obtener tres puntos desacoplados de voltaje, los que para fines prácticos se les da el nombre de: Fase A; Fase B y Fase C. Las fases están ligadas con los brazos del convertidor hexagonal, ya que cada una de las fases está compuesta por dos brazos, uno positivo (M) y otro negativo (P).

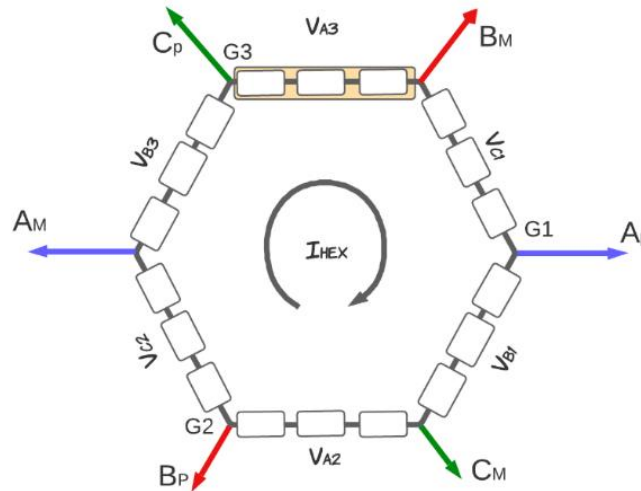


Fig. 4 Sistema cerrado con seis puntos de salida

Fuente: Elaboración propia

Cada rama del convertidor hexagonal está compuesta por N módulos. En la Fig. 4 se puede apreciar que cada una de las ramas está encargada de equilibrar dos fases, por medio de los brazos, la rama V_{A3} , por ejemplo, está encargada de equilibrar la fase B y la fase C mediante sus brazos negativo y positivo, respectivamente. Se asume que cada una de las ramas tiene que generar una forma de onda sinusoidal capaz de equilibrar dos fases del sistema.

Con fines prácticos y computacionales para la simulación del sistema se define N, como $N = 3$ (Anexo A.2) y, cada uno de los módulos será del tipo multinivel serie/paralelo (MSMPC), donde cada uno de estos incluye un elemento almacenador de energía (Fuente DC o Batería). El uso de

módulos MMSPC (Anexo A.1) tiene como finalidad permitir el equilibrio interno entre las unidades de almacenamiento, sin necesidad de estrategias complejas de control o modulación [3],[5].

La ilustración de la topología del sistema se presenta en la Fig. 5. Esta topología busca generar tres terminales de voltaje continuo, por esto se debe implementar una etapa de rectificado en cada una de las fases. Este periodo se hace mediante un rectificador del tipo “Puente de diodos”, acompañado de un capacitor, que tiene el fin de eliminar el rizado y, de esta manera, las salidas de las fases sean completamente continuas.

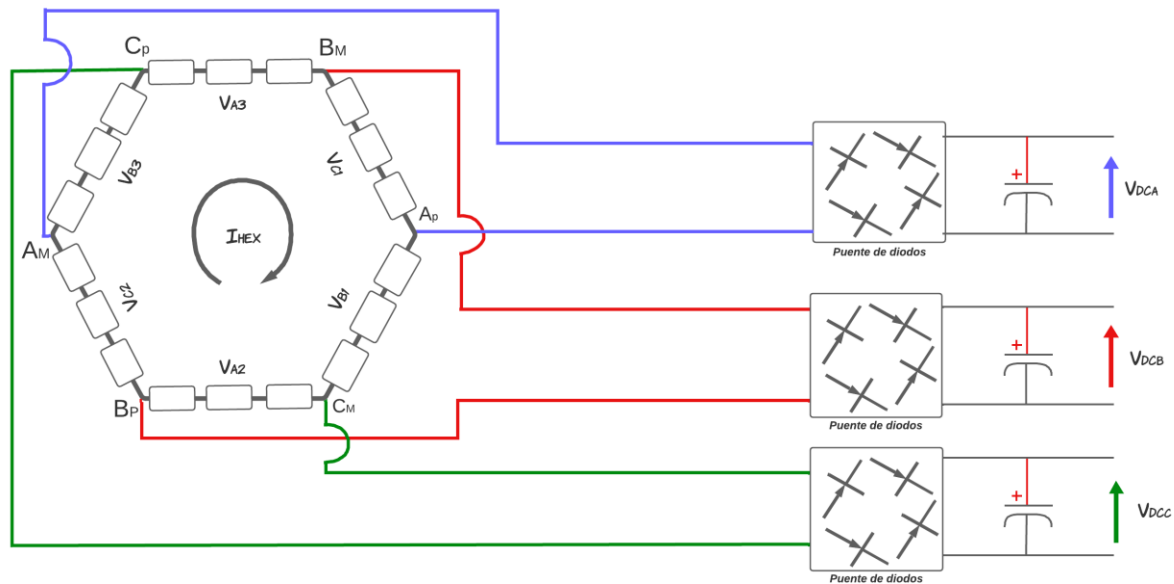


Fig. 5 Topología del convertidor hexagonal

Fuente: Elaboración propia

En los puntos de salidas de la topología, las tensiones de las fases están desacopladas, de manera que se permita el control de tres tensiones DC de forma independiente y con la capacidad de conectar diferentes cargas.

Con el fin de obtener resultados simulados de esta topología, se evaluó con una batería de 150V en cada uno de los módulos MMSPC, esto con la intención de conocer el comportamiento que presentan las baterías.

3.1. Modelo del convertidor hexagonal con MMSPC

3.1.1 Introducción

Con el fin de obtener una mirada integral de lo que es un sistema hexagonal, se revisaron artículos en los cuales se trabaja con distintas tecnologías de semiconductores en topologías hexagonales. [6][9][10]

En [9] la configuración hexagonal, basado en convertidores fuente de voltaje (VSC) de tres niveles con punto neutro anclado (3L-NPC). Los convertidores 3L-NPC presentados cuentan con tres niveles de voltaje, lo que provoca que se genere un voltaje de secuencia cero, debido a que se genera un desequilibrio en las fases. Con el fin de solucionar este problema el documento utiliza un transformador de secuencia cero.

El uso de tres módulos MMSPC por rama en el sistema hexagonal elimina de manera significativa la componente de secuencia cero esto debido a la cantidad de niveles que genera (7 niveles), lo que se debe a que la componente de secuencia cero hace referencia al instante de tiempo donde todas las componentes de fase tienen el mismo valor y están en la misma posición angular, generando así una falta de rotación. En los MMSPC la forma de onda generada también se descompone en secuencia positiva, negativa y cero, sin embargo, debido a su estructura multinivel, la componente cero tiende a atenuarse.

Con el fin de obtener un modelo matemático del sistema hexagonal, cada rama de la topología hexagonal fue simplificada como una fuente de voltaje de DC y acompañado por una impedancia, la que representa las pérdidas en los conductores. Este modelo simplificado se presenta en la Fig. 6.

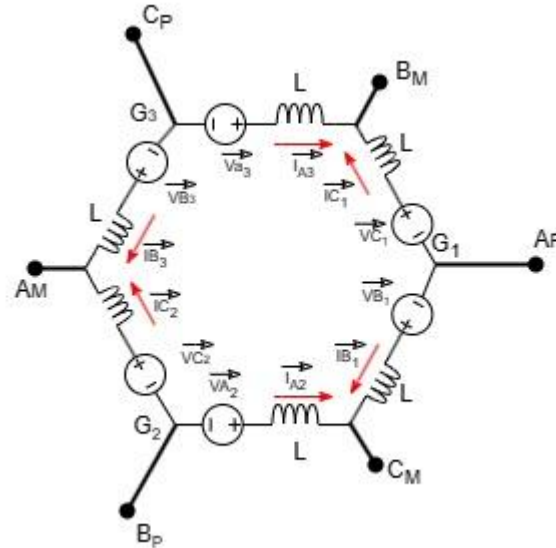


Fig. 6 Convertidor hexagonal con MMSPC

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Análisis de sistema de ecuaciones del circuito hexagonal con módulos MMSPC

En esta sección inicial se expondrán las ecuaciones derivadas para el circuito hexagonal que incorpora módulos MMSPC.

Lo primero que se debe observar es el diagrama del convertidor hexagonal, que se muestra en la Fig. 6. Este modelo presenta un sistema de referencia de la corriente, el cual cuenta con seis nodos y seis ramas que componen la fase A, Fase B y Fase C, de manera de identificar los nodos lo que se presentan con subíndice “M” los nodos positivos y con subíndice “P” los nodos negativos.

En la Fig. 6 se logra desglosar el convertidor hexagonal, de manera de obtener cada una de las fases de manera independiente y, de la misma manera, obtener los seis nodos de corrientes definidos como A_M , B_M , C_M , A_P , B_P , C_P .

Con el propósito de determinar los voltajes presentes en los terminales del convertidor hexagonal con módulos MMSPC, resulta fundamental establecer los valores de corriente en cada uno

de los nodos. Por esta razón, se lleva a cabo un análisis de ley de corriente de Kirchhoff (LCK) en los circuitos simplificados de la Fig. 7. Este proceso conduce a la obtención de las siguientes ecuaciones:

$$A_p \Rightarrow IB_1 + IC_1 = 0$$

$$B_p \Rightarrow IA_2 + IC_2 = 0 \quad (1)$$

$$C_p \Rightarrow IA_3 + IB_3 = 0$$

$$A_M \Rightarrow IB_3 + IC_2 = 0$$

$$B_M \Rightarrow IA_3 + IC_1 = 0 \quad (2)$$

$$C_M \Rightarrow IA_2 + IB_1 = 0$$

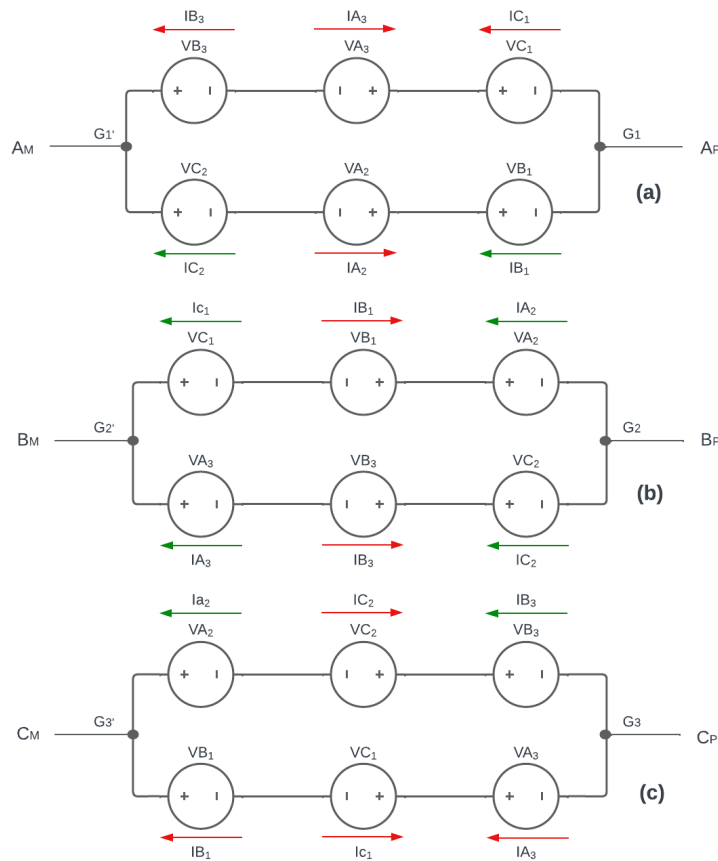


Fig. 7 Convertidor hexagonal simplificado

(a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C

Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones de voltaje en la rama superior y la rama inferior de la Fig.7 (a).

$$V_{Ap-Am} = -Vb_3 + Ib_3 \cdot Zl + Va_3 - Ia_3 \cdot Zl - Vc_1 + Ic_1 \cdot Zl \quad (8)$$

$$V_{Ap-Am} = -Vc_2 + Ic_2 \cdot Zl + Va_2 - Ia_2 \cdot Zl - Vb_1 + Ib_1 \cdot Zl \quad (9)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones correspondientes a la rama superior (8) y a la rama inferior (9), se suman para obtener la ecuación general de V_{Ap-Am} .

$$2 \cdot V_{Ap-Am} = Va_3 + Va_2 - Vb_3 - Vb_1 - Vc_2 - Vc_1 + (Ib_3 + Ic_2 + Ic_1 + Ib_1 - Ia_2 - Ia_3) \cdot Zl$$

Ordenando la ecuación de manera clara y comprensible, se obtiene:

$$2 \cdot V_{Ap-Am} = Va_2 + Va_3 - Vb_1 - Vb_3 - Vc_1 - Vc_2 + (Ib_1 + Ib_3 + Ic_1 + Ic_2 - Ia_2 - Ia_3) \cdot Zl \quad (10)$$

Sustituyendo los valores de las ecuaciones de corriente (A_M y A_P) en la Ec. 10, se llega a los siguientes resultados:

$$2 \cdot V_{Ap-Am} = Va_2 + Va_3 - Vb_1 - Vb_3 - Vc_1 - Vc_2 + (Ib_1 + Ib_3 + Ic_1 + Ic_2 - Ia_2 - Ia_3) \cdot Zl$$

$$2 \cdot V_{Ap-Am} = Va_2 + Va_3 - Vb_1 - Vb_3 - Vc_1 - Vc_2 + (-Ia_2 - Ia_3) \cdot Zl$$

La expresión obtenida se divide matemáticamente en dos, obtenido de esta manera el voltaje en los terminales de salida del voltaje de la fase A del convertidor hexagonal.

$$V_{Am-Ap} = \frac{1}{2} \cdot [Va_2 + Va_3 - Vb_1 - Vb_3 - Vc_1 - Vc_2 - (Ia_2 + Ia_3) \cdot Zl] \quad (11)$$

Para deducir las ecuaciones del voltaje correspondientes a las fases B y C, se realiza una observación desde distintos puntos de referencia. Esta variante permite derivar las ecuaciones simplificadas para las fases mencionadas. Al aplicar el proceso al sistema hexagonal, como se ilustra, por un lado, en la Fig.7 (b) la fase V_{Bp-Bm} y, por otro lado, en la Fig.7(c) la fase V_{Cp-Cm}

$$V_{Bm-Bp} = \frac{1}{2} \cdot [Vb_1 + Vb_3 - Vc_1 - Vc_2 - Va_2 - Va_3 + (-Ib_1 - Ib_3) \cdot Zl] \quad (12)$$

$$V_{Cm-Cp} = \frac{1}{2} \cdot [Vc_1 + Vc_2 - Vb_1 - Vb_3 - Va_2 - Va_3 + (-Ic_2 - Ic_1) \cdot Zl] \quad (13)$$

Existen un caso particular donde se descartan las pérdidas de caída en la inductancia del sistema, las fuentes de voltaje están balanceadas y las referencias de tensión son las mismas en cada fase. En este caso se genera las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 Va_1 = Va_2 = Va_3 &\Rightarrow Va & Ia_1 = Ia_2 = Ia_3 &\Rightarrow Ia \\
 Vb_1 = Vb_2 = Vb_3 &\Rightarrow Vb \Rightarrow Va \cdot e^{\frac{2\pi}{3}} & Ib_1 = Ib_2 = Ib_3 &\Rightarrow Ib \\
 Vc_1 = Vc_2 = Vc_3 &\Rightarrow Vc \Rightarrow Va \cdot e^{-\frac{2\pi}{3}} & Ic_1 = Ic_2 = Ic_3 &\Rightarrow Ic
 \end{aligned} \quad (14) \quad (15)$$

De esta manera aplicando (14) y (15) en las ecuaciones de las fases del sistema hexagonal (11), (12), (13) se tiene un modelo simplificado del sistema.

$$V_{Am-Ap} = Va - Vb - Vc - Ia \cdot Zl \quad (16)$$

$$V_{Bm-Bp} = Vb - Vc - Va - Ib \cdot Zl \quad (17)$$

$$V_{Cm-Cp} = Vc - Vb - Va - Ic \cdot Zl \quad (18)$$

Por un lado, en las ecuaciones (11), (12) y (13) se presenta el modelo matemático del voltaje de salida de cada una de las fases del convertidor, de esta manera se pueden precisar los niveles del voltaje alcanzado en cada una de las fases. Por otro lado, las ecuaciones (16), (17) y (18) se obtienen de un modelo donde todas las ramas se encuentran balanceadas con los mismos niveles de voltaje, obteniendo así un modelo simplificado que permite comprender que mediante la generación de tres índices de modulación (Va , Vb , Vc) se puede controlar toda la topología hexagonal de manera balanceada, generando así enfoque analítico y matemático para una comprensión más profunda del comportamiento eléctrico del sistema.

3.2. Sistema de control para el convertidor hexagonal

Este capítulo presenta un sistema capaz de controlar los tres índices de modulación que se requieren para estabilizar la topología hexagonal y, de esta manera, establecer el continuo funcionamiento de la topología.

3.2.1 Sistema de control

Este sistema de control se implementa con el fin de hacer un sistema independiente que se sincronice de manera autónoma, sin depender de una estructura externa (Red). Este lazo de control entrega autonomía, ya que solo depende de los elementos internos del sistema hexagonal (baterías o fuente).

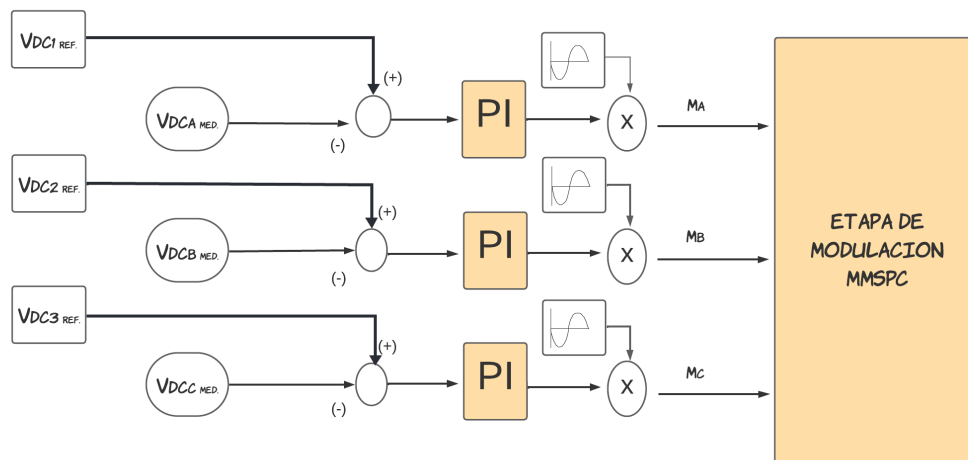


Fig. 8 Lazo de control para el sistema hexagonal

Fuente: Elaboración propia

En este lazo de control se aprecian principalmente tres etapas fundamentales: medición, reajuste y modulación MMSPC.

En la etapa de medición se hace una comparación entre el voltaje de salida del convertidor hexagonal, con respecto al voltaje que requieran las cargas, de esta manera, se genera un lazo realimentado, la diferencia entre estos valores se conoce como error.

La etapa de reajuste está compuesta por un controlador del tipo proporcional-integrativo, el cual está encargado de ajustar el error actual y el error durante el tiempo, de manera de proporcionar

una respuesta rápida a las perturbaciones y eliminar errores, generando así un control más preciso y señales continuas, es por esto que a la salida del controlador las señales se multiplican por señales sinusoidales normalizadas, balanceadas y desfasadas en 120° , de esta manera se generan tres índices de modulación alternos y balanceados que alimentan a las ramas.

La etapa de modulación se explicó con detalle en el capítulo 4.

Capítulo 4. Parámetros y resultados

En este capítulo se presentan los resultados y parámetros utilizados para demostrar la efectividad del sistema. Para esto se realizaron cuatro pruebas. La primera prueba consta en obtener el valor del voltaje de convertidor en circuito abierto para apreciar el número de niveles. Esta prueba se realiza con una fuente de voltaje DC y, posteriormente, con una batería. La segunda prueba para realizar es aplicar una resistencia y voltaje igual en las tres fases del convertidor, la tercera prueba consiste en generar una variación en la resistencia de la carga y, la cuarta prueba es variar el voltaje que se requiere en cada una de las fases del convertidor.

4.1. Número de niveles del convertidor MMSPC

En este capítulo se verán reflejados los niveles del convertidor hexagonal sin carga, en primera instancia se presentarán los resultados del convertidor hexagonal con una fuente de voltaje continuo de 150 V en cada uno de los módulos, en segunda instancia se presentarán los resultados del convertidor con base en baterías.

4.1.1 Fuente de voltaje continuo $V_{DC=150[V]}$

En esta prueba se implementó un total de dieciocho fuentes de voltaje continuo en cada uno de los módulos MMSPC, con el fin de identificar los niveles que presenta cada una de las fases del convertidor hexagonal. (Anexo A.3)

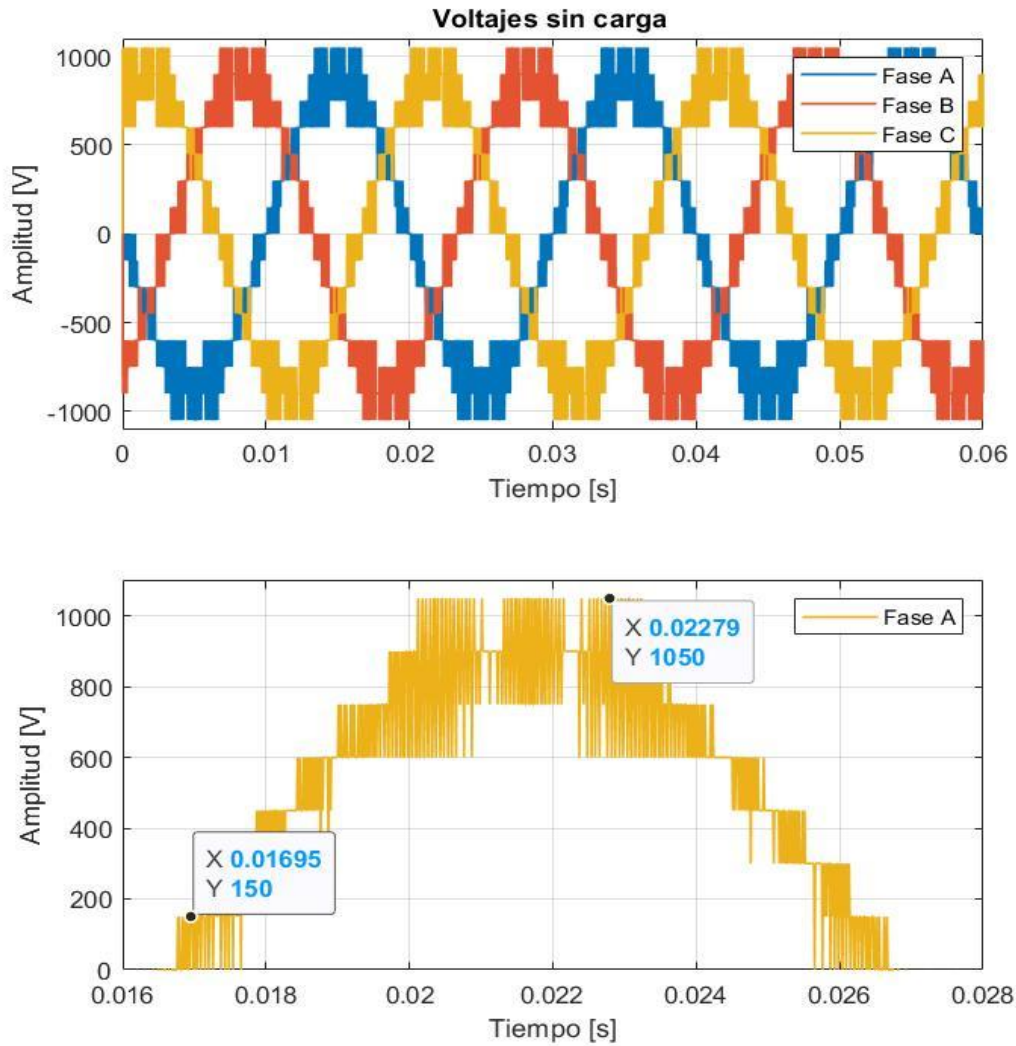


Fig. 9 Voltaje del convertidor hexagonal con fuente de voltaje continuo

Fuente: Elaboración propia

En la fig. 9 se puede apreciar un total de siete niveles donde cada uno de estos tiene una amplitud igual a la de la fuente de voltaje (150 [V]). El valor peak del voltaje en cada una de las fases del convertidor queda expresada por:

$$V_{Peak} = N * V_N \quad Ec.(9)$$

Siendo:

N: Numero de niveles

V_N : Voltaje por nivel

El valor peak es el valor máximo que alcanza el convertidor en cada una de sus fases, en el convertidor hexagonal presentado con fuentes de voltaje de 150[V] en cada nivel, alcanza un valor peak de ± 1050 [V].

4.1.2 Baterías $V_{\text{nom}} = 150$ [V]

En esta prueba se implementó un total de dieciocho baterías en el convertidor hexagonal, una batería por cada módulo MMSPC.

La prueba se realizó con el fin de conocer el comportamiento en los niveles del convertidor hexagonal al ser implementado mediante baterías. Se puede apreciar que al igual que cuando se implementa con fuentes de voltaje continuo, se obtiene un total de siete niveles. Los valores de los parámetros de cada una de las baterías se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros de la batería

Tipo de batería	Ion-Litio
Voltaje nominal(a)	150 V
Capacidad nominal	5.4 Ah
Estado de carga inicial	100 %
Tiempo de respuesta batería	30 s

Fuente: Elaboración propia

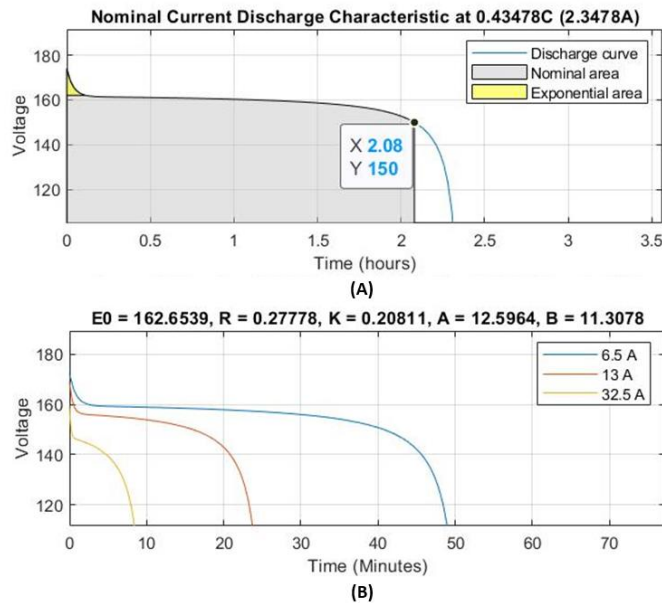
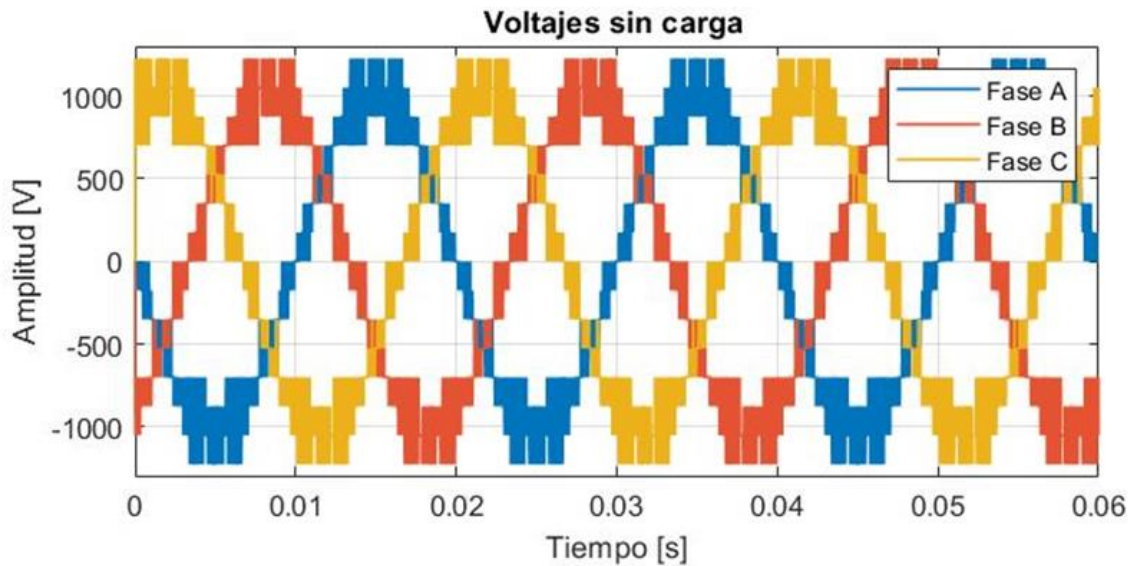


Fig. 10 Curvas de la batería

Fuente: Matlab

En la fig. 10 (A), se presenta la curva característica de la descarga de una batería con una tasa $C = 2.3478A$, esta se descompone en tres partes importantes: la primera sección, que representa la caída exponencial de voltaje con una batería cargada; la segunda parte presenta la carga que se puede extraer de la batería hasta que el voltaje alcance valores inferiores al voltaje nominal (150 V) y, la última sección presenta cuando una batería se encuentra en el peak de descarga. En la parte inferior se puede apreciar las curvas de descarga de la batería con diferentes valores de tasa C , generando diferentes tiempos de descarga de la batería.



(A)



(B)

Fig. 11 Voltaje del convertidor hexagonal con baterías

Fuente: Elaboración propia

Considerando los parámetros de las baterías presentado en la Tabla 2, se obtuvo el valor del voltaje del convertidor hexagonal sin carga, el que cuenta con un total de siete niveles. Al momento de generar una simulación con base en baterías se logra apreciar que la amplitud de los niveles es un 16.67% superior al voltaje nominal de la batería, alcanzando de esta manera un valor por nivel de 175.248V. Aplicando (9) se obtiene que el valor peak de voltaje para el convertidor hexagonal, utilizando baterías es de 1226.74[V]. Lo que coincide con el resultado de la simulación fig.11(B)

4.2. Resultado del convertidor hexagonal baterías

Los resultados del convertidor hexagonal con base en baterías se dividen en tres pruebas. La primera prueba es con un voltaje constante en la salida e igual para las tres fases y con resistencia en las cargas iguales, la segunda prueba consiste en variar el valor de la carga en cada una de las fases manteniendo el mismo voltaje de referencia y, la tercera prueba consiste en variar el voltaje de cada una de las fases manteniendo el valor de las resistencias.

4.2.1 Cargas resistivas constante

Esta prueba consiste en obtener el voltaje a la salida del convertidor, cuando los elemento que se conecta al sistema hexagonal tengan la misma resistencia y requieran el mismo nivel de voltaje, con el fin de obtener la respuesta del sistema ante variaciones de tensión. Como se puede observar en la Tabla 4.2 en el instante de 4[s] se generó una caída en la tensión en cada una de las fases. Para esta prueba se utilizaron los valores ideales presentados en dicha tabla.

Tabla 4.2. Parámetros para la simulación del sistema hexagonal con una resistencia constante

Parámetros	> 4[s]	< 4 [s]
Tiempo de muestreo	10[ms]	
Ctrl. Proporcional	1×10^{-5}	
Ctrl. Integrativo	4×10^{-4}	
Voltaje Fase A	600 [V]	400 [V]
Voltaje Fase B	600 [V]	400 [V]
Voltaje Fase C	600 [V]	400 [V]
Resistencia Fase A	1000 [Ω]	
Resistencia Fase B	1000 [Ω]	
Resistencia Fase C	1000 [Ω]	

Inductancia fase: A, B & C	10[mH]
Resistencia Interna	0,1 [Ω]
Inductancia interna	100 [mH]

Fuente: Elaboración propia

Los datos para destacar de la Tabla 4.2 Son:

- Los valores del controlador presentado en el inciso 7.2 donde se tiene, por un lado, la parte proporcional la cual controla el error actual, tomando un valor de 1×10^{-5} y, por otro lado, la parte integrativa que controla la sumatoria del error durante el tiempo, tomando esta última el valor de 4×10^{-4} .
- El valor de los voltajes en el control de cada una de las fases, siendo 600[V] en los primeros 4 [s] , posteriormente, decae a 400[V] debido a la aplicación de un impacto de carga.
- El valor de la resistencia e inductancia que es igual en cada una de las fases del convertidor.

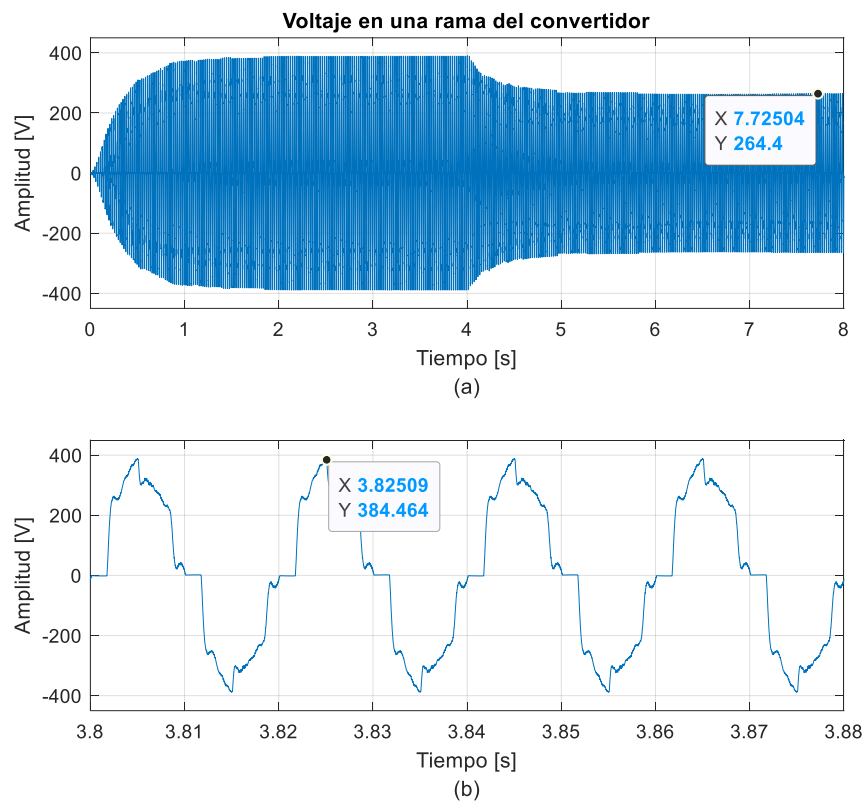


Fig. 12 Voltaje en una rama (VA_3) del convertidor.

(a) Rama A convertidor (b) Cuatro ciclos de voltaje

Fuente: Elaboración propia

El voltaje de una rama del convertidor (Fig.12). Se aprecia un voltaje peak en la rama A de 384.5[V] en el instante que la fase de conjunto hexagonal total requiere 600[V] y un voltaje de 264.4[V] cuando la fase del convertidor requiere 400[V]. Con este análisis se puede observar que la rama del sistema hexagonal genera un 64% de lo requerido en la fase A, esto considerando un margen de error de 3% entre las ramas.

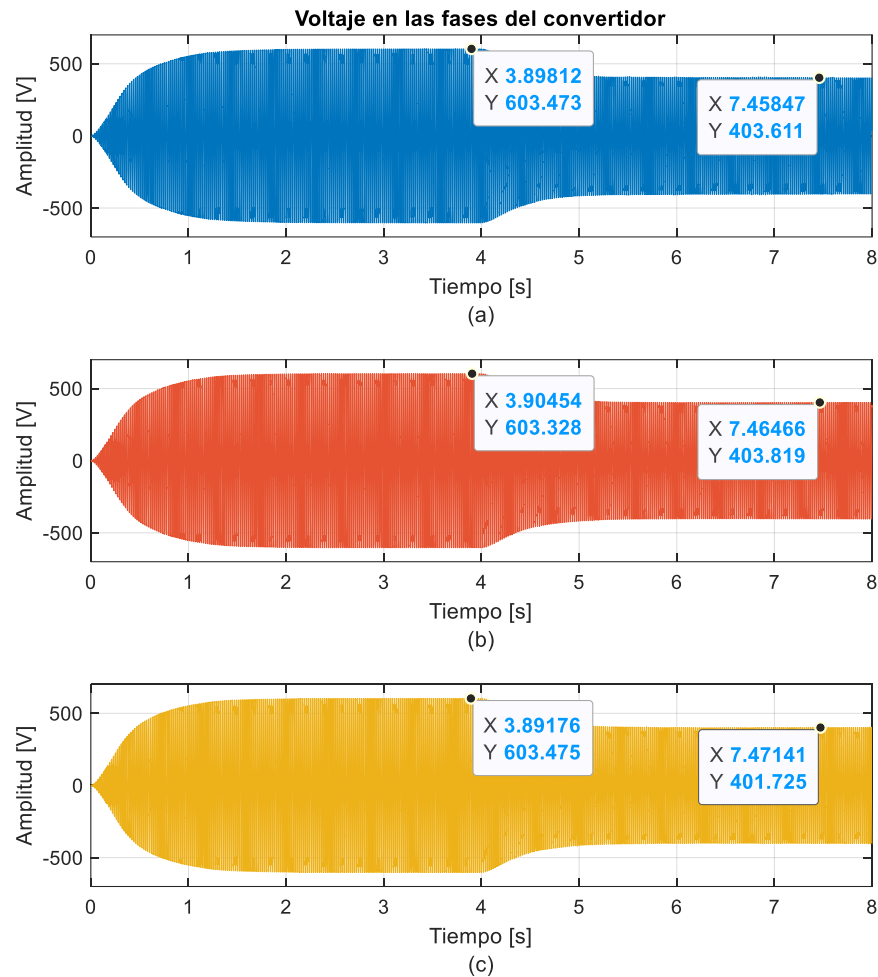


Fig. 13 Voltaje del lado AC del convertido hexagonal con carga constante.

(a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores del voltaje en cada una de las fases en el lado AC del convertidor hexagonal (Fig.13), se puede apreciar que existe un factor común producto de la carga y la variación de voltaje es el mismo en cada una de las fases, puesto que se tiene un voltaje de 603 [V] con una

variación de $\pm 3[V]$ en los primeros instantes, donde, posteriormente, al decaer el voltaje que requiere la carga, se obtiene un voltaje de 401 [v], conservando el mismo margen de variación.

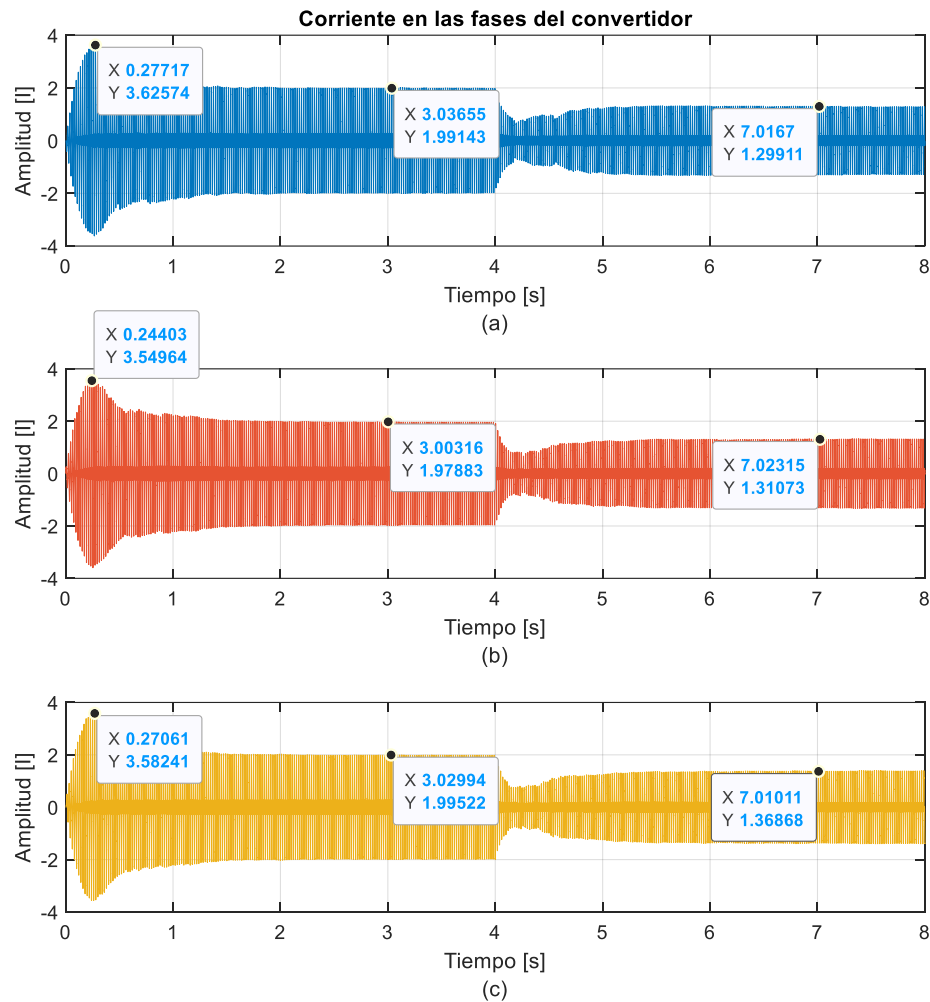


Fig. 14 Corrientes AC del convertidor con carga constante.

(a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.14 se aprecia la corriente del lado AC el convertidor hexagonal, destacando los siguientes puntos:

- La corriente de la partida del convertidor es un 79% mayor que la corriente de asentamiento para 600[v].

- Cuando se requieren 600[V] en la carga la corriente que circula por el lado AC del convertidor es de 1.995[A], en cambio cuando el convertidor requiere 400[V] la corriente que circula es de 1.368[A].
- Debido a que se tiene una carga constante y las variaciones de voltaje se generan a los 4[s] en las tres fases del convertidor, se tiene que el comportamiento de la corriente es el mismo en cada una de las fases.

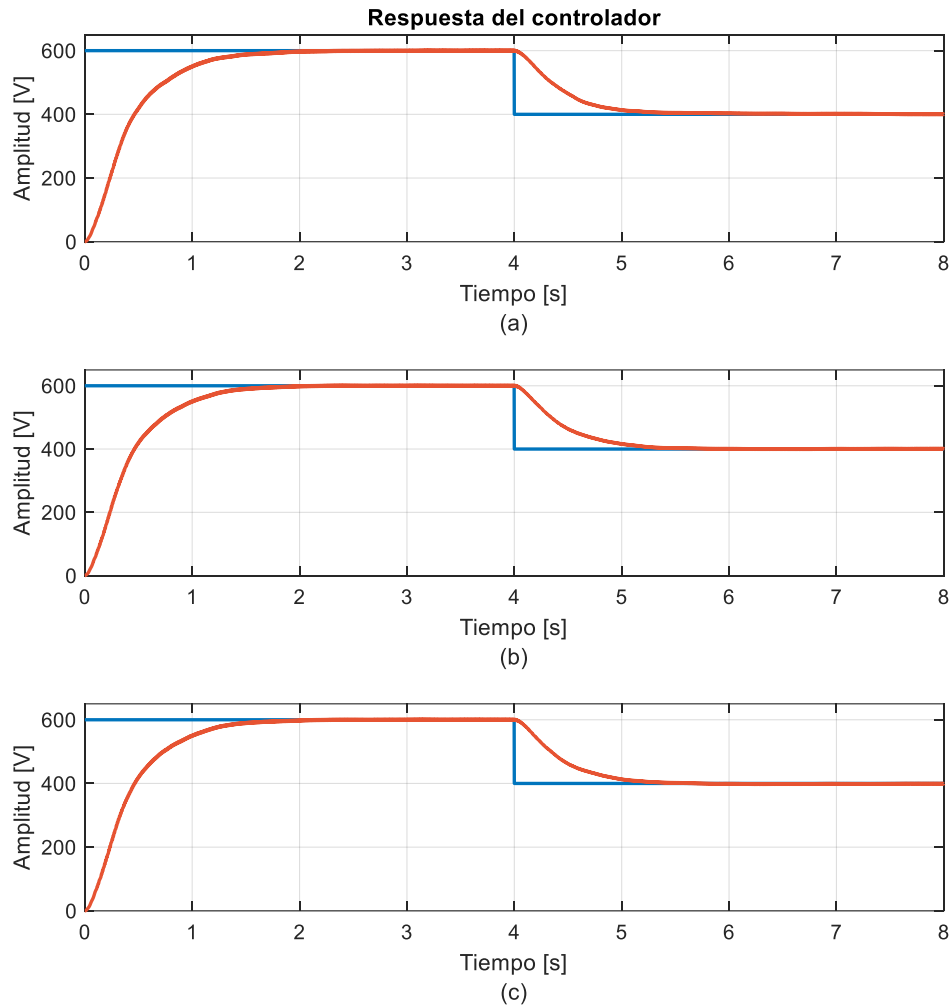


Fig. 15 Respuesta de los controladores.

(a)Fase A (b)Fase B (c)Fase C

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 15 se aprecia la respuesta del controlador PI ante las variaciones en la carga y, los principales puntos a destacar son:

- En cada una de las fases del convertidor se presentan dos gráficos, el voltaje de referencia (Azul), que es el voltaje que demanda la carga en cierto instante de tiempo, y la respuesta del controlador (Rojo), que es la respuesta del control.
- El tiempo de asentamiento para las tres fases del convertidor es el mismo, debido a que se presenta una carga constante, la variación de voltaje es la misma y los parámetros de los lazos de control son iguales
- El tiempo de asentamiento de la corriente del convertidor cuando parte desde el reposo es de 1.5[s], en cambio cuando pasa de un voltaje de 600[V] a un voltaje de 400[v] el tiempo de asentamiento es menor, alcanzando así un tiempo aproximado de 1[s].

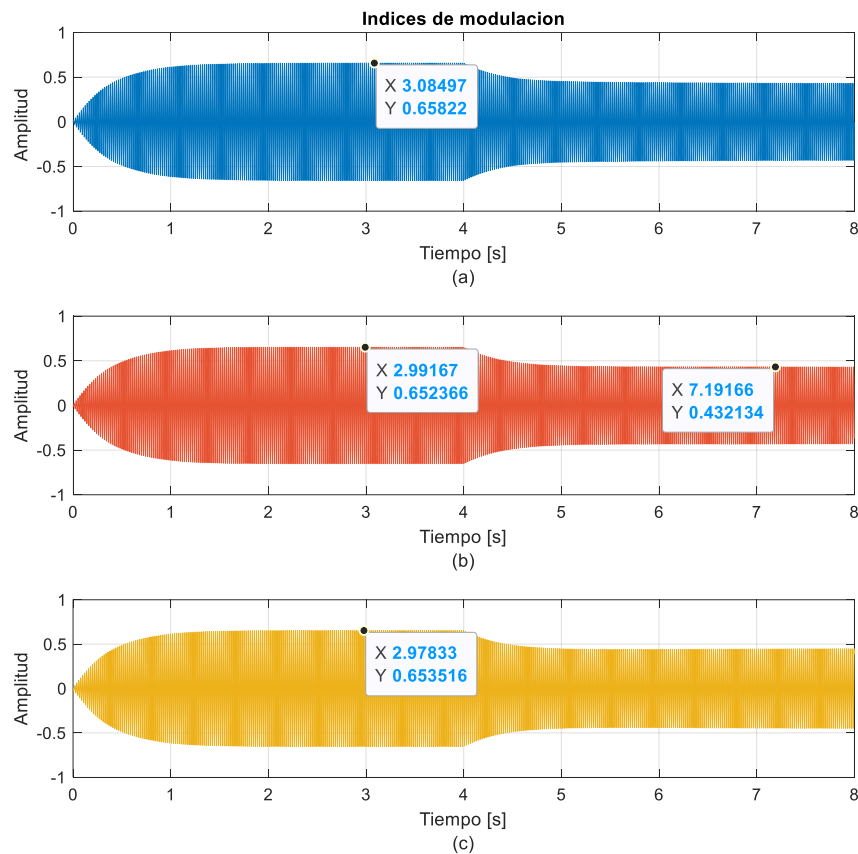


Fig. 16 Índices de modulación con una referencia de voltaje constante e igual para las tres fases del sistema

(a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 16 se puede apreciar los índices de modulación de cada una de las fases del convertidor hexagonal, los puntos a destacar:

- El índice de modulación, cuando la carga conectada al convertidor requiere 600 [V], es de 0.65 y el índice de modulación del convertidor, cuando la carga requiere un voltaje es de 400[V], es de 0.43. Considerando que el índice de modulación puede alcanzar una amplitud cercana a 1 se tiene que el voltaje máximo que se puede demandar en la carga para este tipo de convertidor es de 922[V] por fase.
- El comportamiento del índice de modulación de las fases es el mismo.

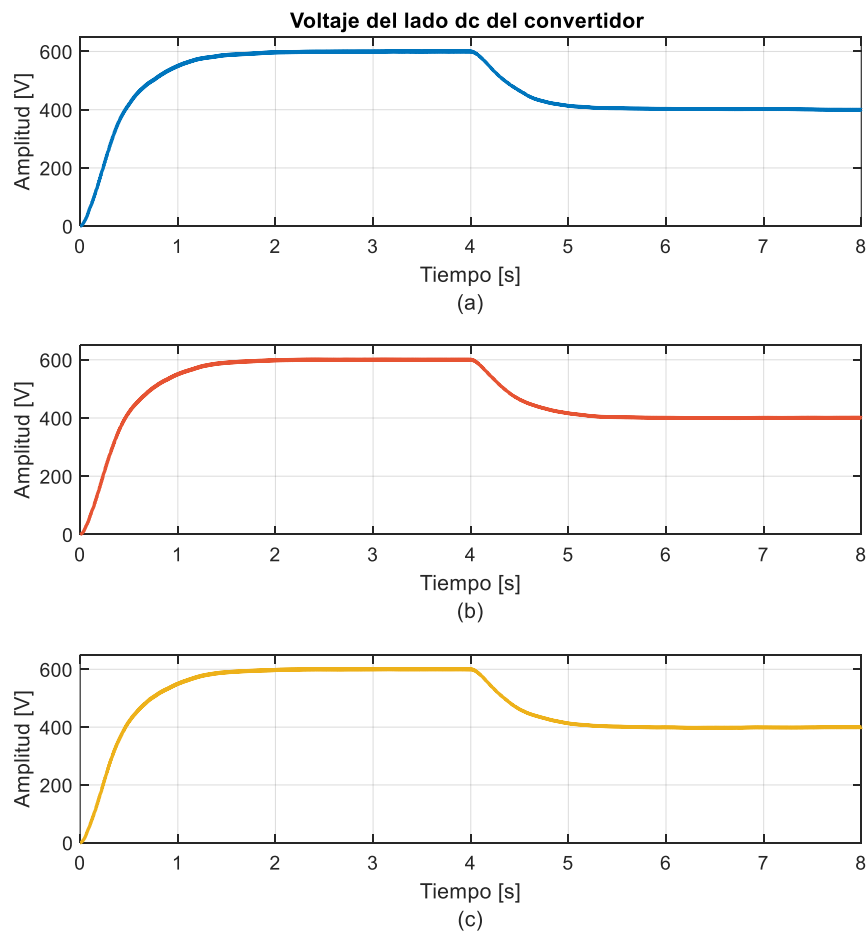


Fig. 17 Voltaje del lado DC del convertidor.

(a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.17 se presenta el voltaje en cada una de las fases del lado DC del convertidor hexagonal, los puntos importantes a destacar en el voltaje son:

- En cada una de las gráficas se presenta una de las fases del convertidor, asimismo en cada una de las fases se tiene un voltaje continuo de 600[V] que a los 4[s] de simulación decae y alcanza un voltaje continuo de 400[V]. Este comportamiento se repite en cada una de las fases del convertidor.

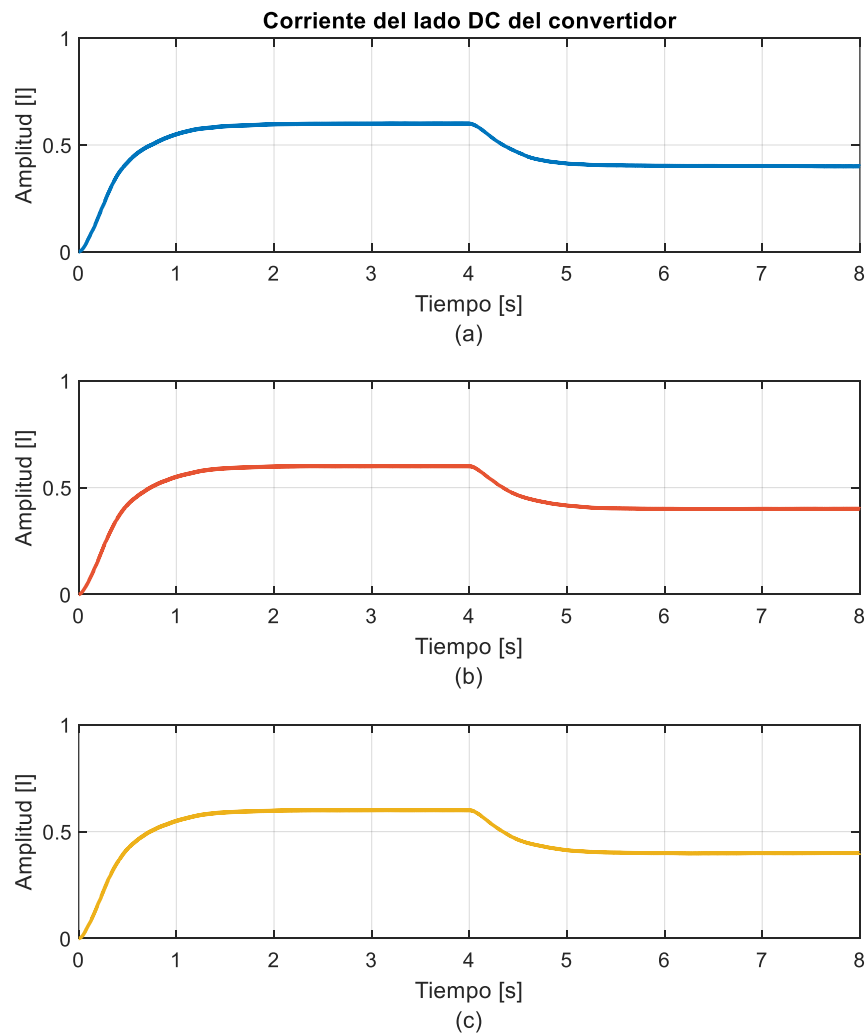


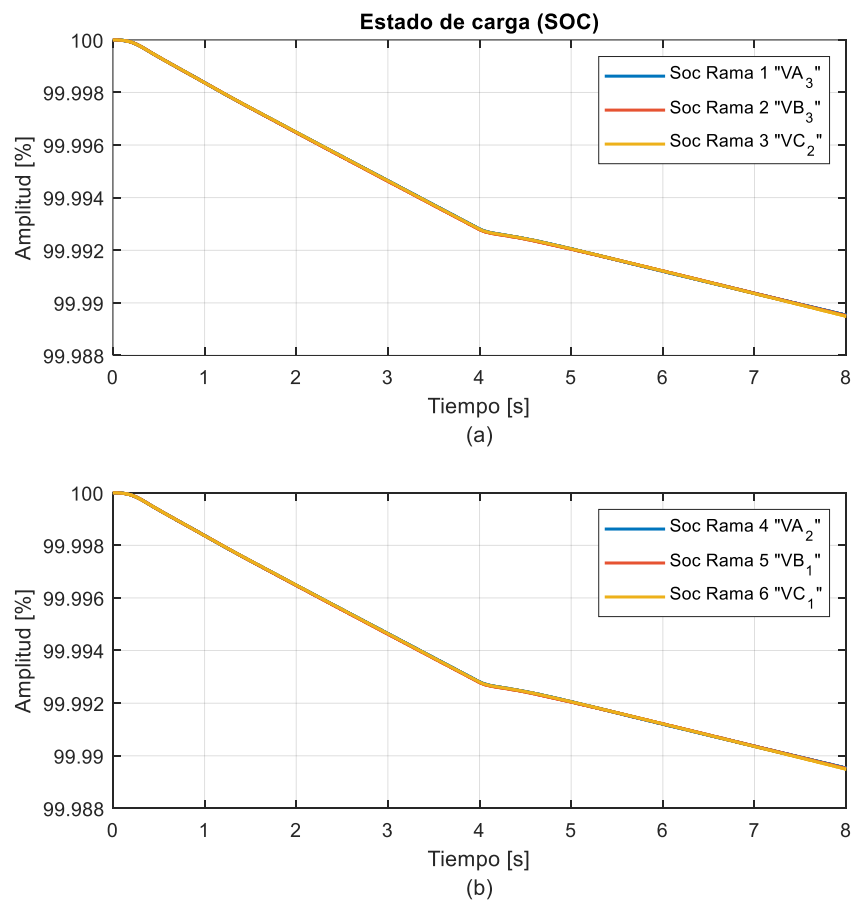
Fig. 18 Corriente del lado DC del convertidor.

(a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.18 se presenta la corriente en cada una de las fases del lado DC del convertidor hexagonal, los puntos importantes a destacar en la corriente son:

- Se puede apreciar que el comportamiento de la corriente es constante y cuando se alcanza un voltaje de 600 [V] la corriente del sistema hexagonal es de 0.6[A], en cambio cuando el voltaje del convertidor es de 400 [V] la corriente que recibe la carga es de 0.4[A] debido a la aplicación de un impacto de carga.



En la Fig. 19 se puede apreciar el estado de carga de una de las baterías en cada una de las ramas del convertidor esto con el fin de ver cuál es el comportamiento de descarga que presentan estas. Dentro de los puntos relevantes destacan:

- La descarga de las ramas superiores es igual a la descarga de las ramas inferiores.
- El estado de descarga en las seis ramas del convertidor es el mismo, debido a que se utilizó una carga constante.
- Al disminuir el voltaje demandado por la carga, la pendiente de descarga de las baterías de cada una de las ramas del convertidor es menor, generando así un menor desgaste en las baterías.

En la fig. 20 se expone el voltaje de las tres baterías que componen una rama del convertidor, estas están definidas de izquierda a derecha y se presentan las ramas 1(V_{a3}), 2(V_{B3}) y 3(V_{C2}), esto debido a que las ramas 4(V_{a2}), 2(V_{B1}) y 3(V_{C1}), presentan un comportamiento homogéneo

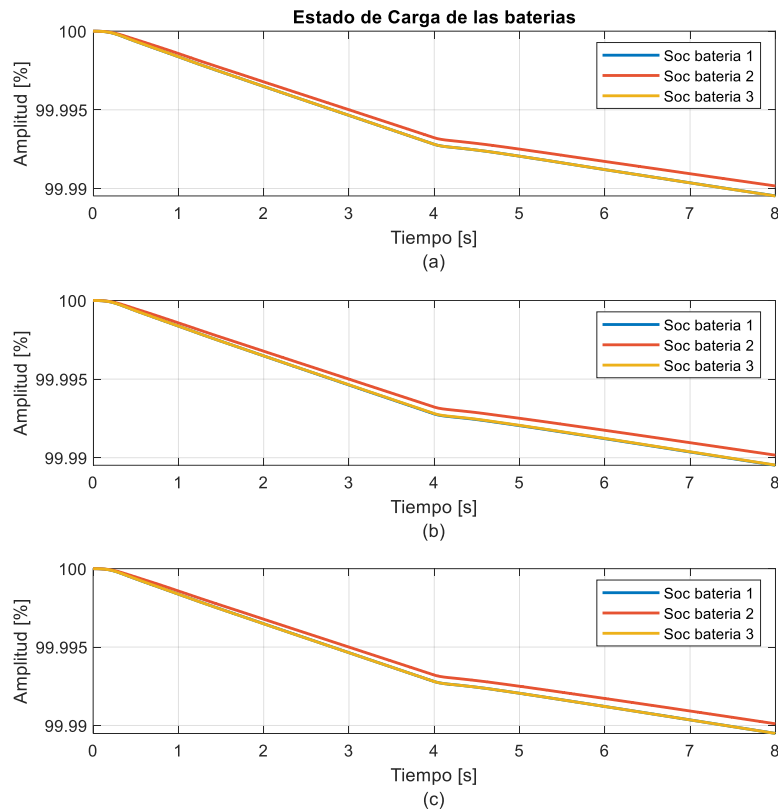


Fig. 20 Estado de carga (SOC) por batería en las ramas.

(a) Rama 1 (b) Rama 2 (c) Rama 3

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 20 se puede apreciar el estado de carga de cada una de las baterías, esto con el fin de ver cuál es el comportamiento de descarga que presentan las baterías. Los puntos relevantes para destacar son:

- En la Fig.20 (a) se presenta la descarga de las baterías en la rama 1 del convertidor. En esta se puede apreciar un comportamiento de descarga lineal, sin embargo, la batería del centro de la rama tiende a tener una menor descarga que las baterías laterales, este comportamiento se mantiene en cada una de las ramas del convertidor.
- La descarga de las baterías por rama del convertidor presenta una descarga lineal, incluso cuando se genera un cambio en la demanda de la carga.
- Se tiene una descarga de un 0.01 % en 8 [s] de simulación.

4.2.2 Variación en la carga

Esta prueba consiste en medir el voltaje a la salida del convertidor cuando los elementos conectados a cada una de las fases del convertidor tengan valores de carga diferentes, pero al mismo tiempo requieran el mismo nivel de voltaje, con el fin de estudiar la respuesta que presenta en el tiempo el convertidor. En el instante de 4[s] se generó una variación en el voltaje, cambio de 600[v] constante a 400[v] constantes. Los parámetros utilizados para la simulación se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 2.3 Parámetros para la simulación del sistema hexagonal con variaciones en la carga

Parámetros	> 4[s]	< 4 [s]
Tiempo de muestreo		10[ms]
Ctrl. Proporcional		1.0×10^{-5}
Ctrl. Integrativo		4.0×10^{-3}
Voltaje Fase A	600 [V]	400 [V]
Voltaje Fase B	600 [V]	400 [V]
Voltaje Fase C	600 [V]	400 [V]
Resistencia Fase A		1000 [Ω]
Resistencia Fase B		2000 [Ω]
Resistencia Fase C		3000 [Ω]
Inductancia fase: A, B & C		10[mH]
Resistencia Interna		0,1 [Ω]
Inductancia interna		100 [mH]

Fuente: Elaboración propia

Los datos para destacar de la Tabla 4 son:

- Se conservan los valores del controlador, donde se tiene, por un lado, la parte proporcional, la cual controla el error actual, tomando un valor de 1×10^{-5} y, por otro lado, la parte integrativa, que controla la sumatoria del error durante el tiempo, tomando esta última el valor de 4×10^{-4} .
- El valor de los voltajes en el control de cada una de las fases es de 600[V] en los primeros tres segundos y, posteriormente decayó a 400[V].
- El valor de la resistencia varía por fase. en la fase A, se tiene una resistencia de 1000[Ω], en la fase B una resistencia de 2000[Ω] y, en la fase C una resistencia de 3000[Ω]. La inductancia es igual en cada una de las fases del convertidor.

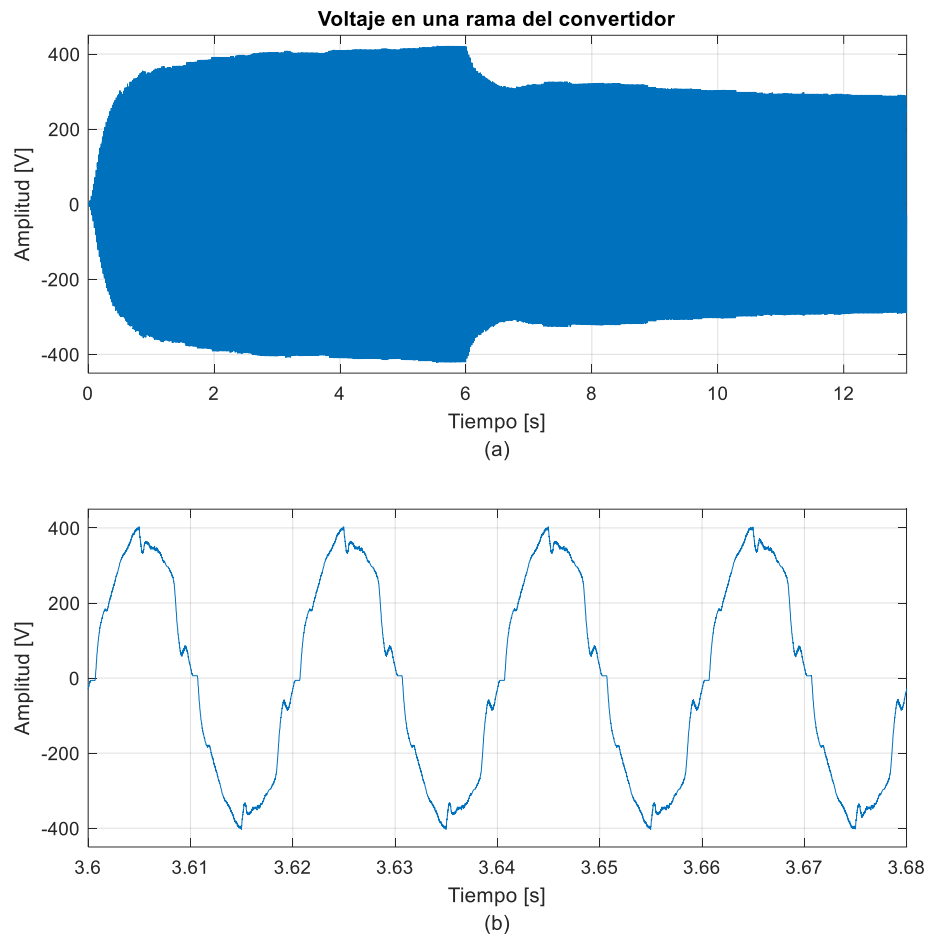


Fig. 21 Voltaje de una rama del convertidor

Fuente: Elaboración propia

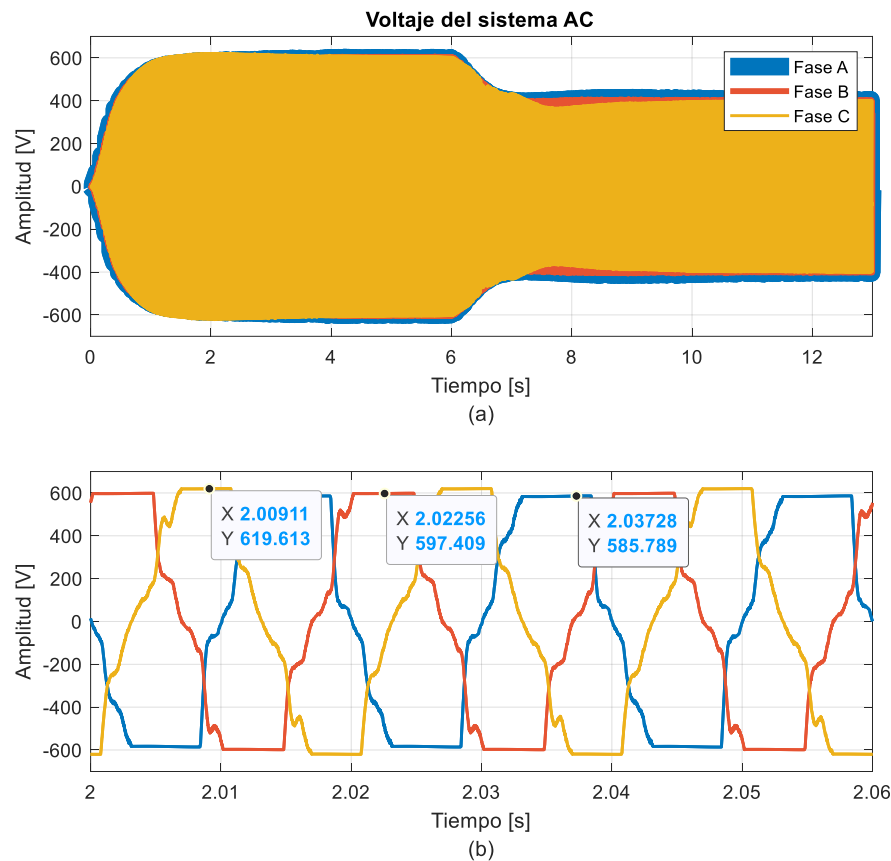


Fig. 22 Voltaje lado AC del sistema hexagonal con variación en la carga

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 22 se presenta el voltaje alterno que se obtiene al medir cada una de las fases del lado AC del convertidor hexagonal. Entre los parámetros importantes para destacar son los siguientes:

- En la Fig. 22(a) se aprecia el comportamiento del voltaje en el tiempo y cómo el voltaje decae de los 600 [v] a los 400 [v] a los 6[s].
- Al tener cargas distintas, el voltaje en cada una de las fases tiene respuestas diferentes para lograr asentarse en el voltaje requerido. Lo anterior se puede apreciar en la Fig.22(b), donde en los primeros instantes de la simulación del convertidor sus fases se encuentran desbalanceadas, pero a los 4 segundos de simulación el voltaje se estabiliza en 600 [v] en cada una de sus fases.

- Cuando se genera una caída en la tensión y de manera que el voltaje requerido en las cargas es de 400 [V] el tiempo de asentamiento para las tres fases es de 4 [s].

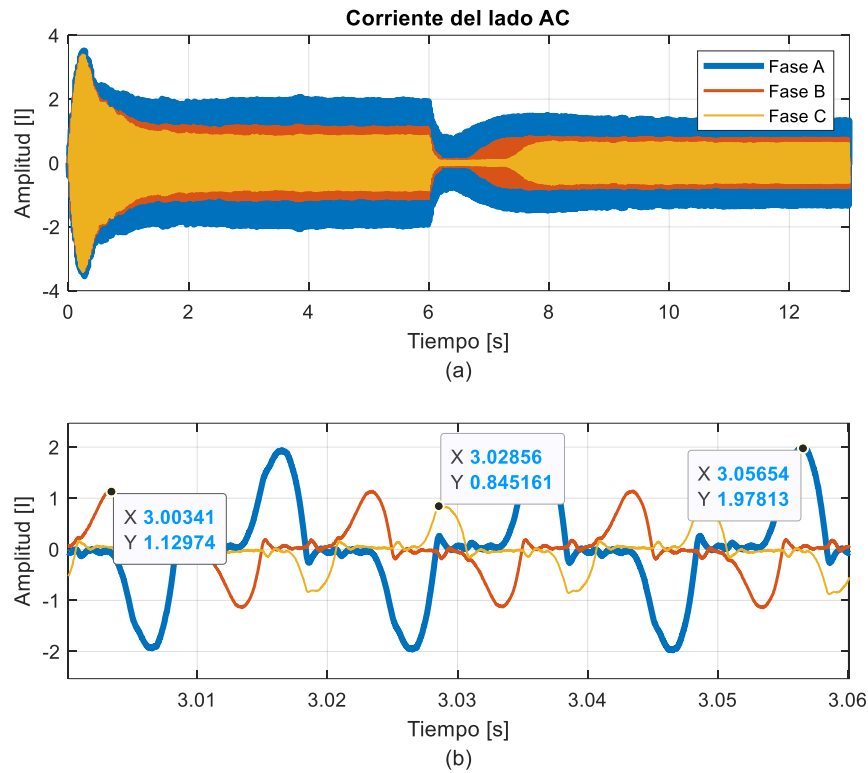


Fig. 23 Corriente lado AC del sistema hexagonal con variación en la carga

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 23 se presenta el comportamiento de la corriente del sistema hexagonal, al variar la carga, entendiendo que el voltaje del sistema se mantiene constante y lo que varíe entre fases es el voltaje, se tiene que la corriente en cada una de las fases es distinta. Los puntos más importantes que se pueden desprender de la forma de onda de la corriente son:

- La corriente de la fase A del convertidor es de 1.97[A], la fase B es de 1.12[A] y la fase C, es de 0.84[A].
- Al momento de que se genera un impacto de carga, decayendo el voltaje desde los 600 a 400 [V] la respuesta de la corriente es más rápida en la fase A, para asentarse en el nuevo valor de corriente, a diferencia de la fase C que demora mayor tiempo.

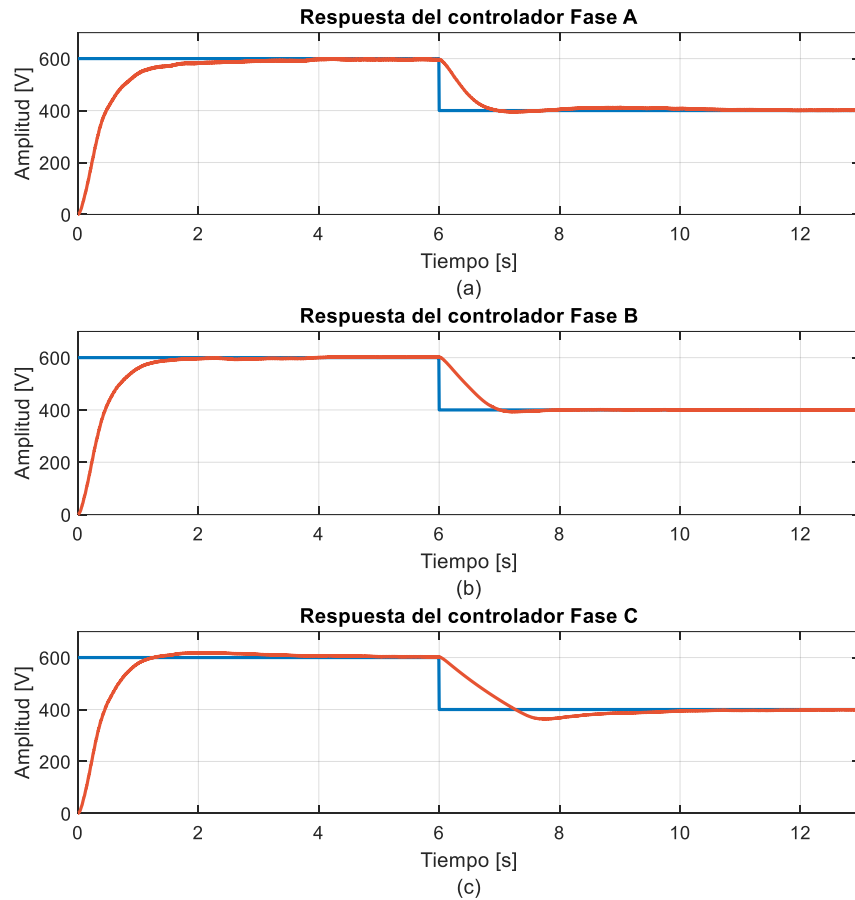


Fig. 24 Respuesta de los controladores.

(a)Fase A(b)Fase B(c)Fase C

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 24 se logra apreciar el comportamiento de los controladores en cada una de las fases. Las principales observaciones son:

- En la Fig. 24(a) se aprecia el comportamiento de la fase A del convertidor. Cuando la resistencia de la carga tiene un valor de $1000[\Omega]$, se puede apreciar que la respuesta del controlador es de tipo sobre amortiguado en el lado de $600[V]$ y sub amortiguado en el lado de $400[V]$.
- En la Fig. 24(b) se aprecia el comportamiento del controlador en la fase B del convertidor. Cuando la carga tiene un valor de $2000[\Omega]$, se puede apreciar que la respuesta del controlador es de tipo sobre amortiguado en el lado de $600[V]$ y sub amortiguado en el lado de $400[V]$.

- En la Fig.24(c) se observa la respuesta que presenta el controlador ante un convertidor hexagonal con una resistencia de $3000[\Omega]$. La respuesta del convertidor es del tipo sub amortiguado en el lado de 600V como en el lado de 400[V].

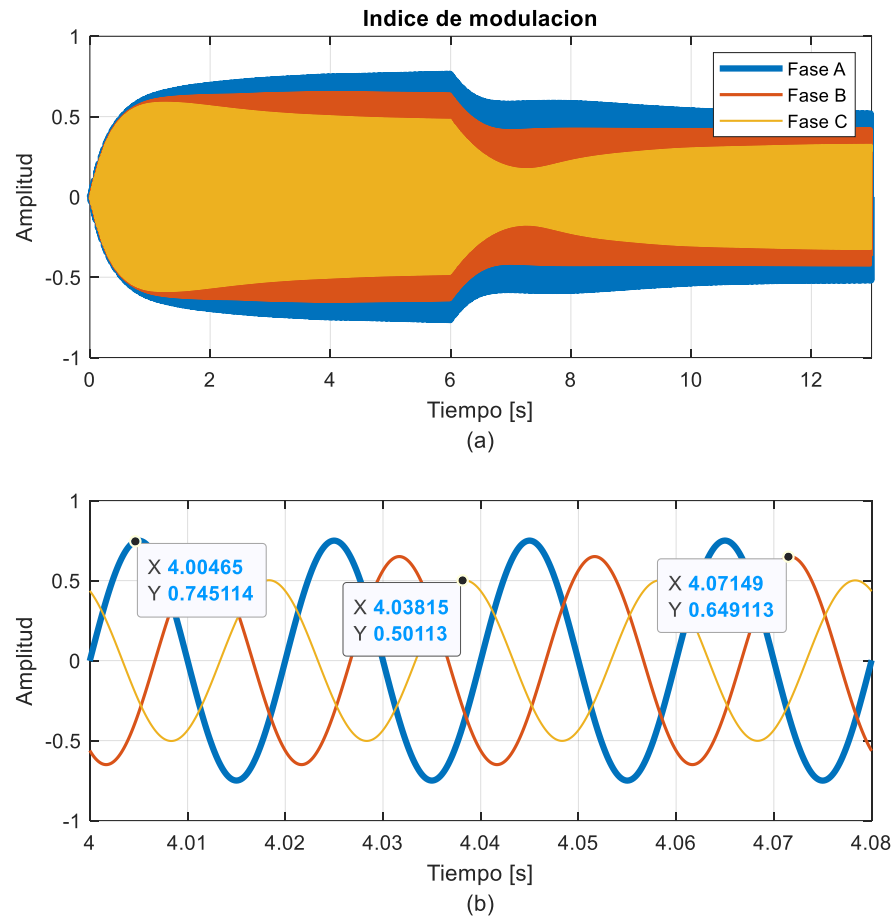


Fig. 25 Índices de modulación de las fases del convertidor con carga variable

(a) índice de modulación con impacto de carga (b)Ciclo de índice de modulación a 600[V]

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.25 se presentan los índices de modulación de cada una de las fases de convertidor y cómo estos varían respecto al tiempo. Los principales puntos para resaltar son:

- El índice de modulación de la fase A tiene un valor de 0.75 para un voltaje de 600[V], es decir, que el valor máximo que podría alcanzar esta fase del convertidor sin perder su estabilidad y conservar la señal sin distorsión, sería de 800[V] alcanzando así un índice de modulación

cercano a la amplitud 1 (Valor máximo del índice que modulación que impide que se genere una distorsión en la señal).

- El índice de modulación de la fase B tiene un valor de 0.65 para el voltaje de 600[V], considerando una carga de 2000[Ω].
- El índice de modulación de la fase C es de 0.5 para el voltaje de 600[V], es decir que el convertidor en la fase C puede demandar un total de 1200 [V].

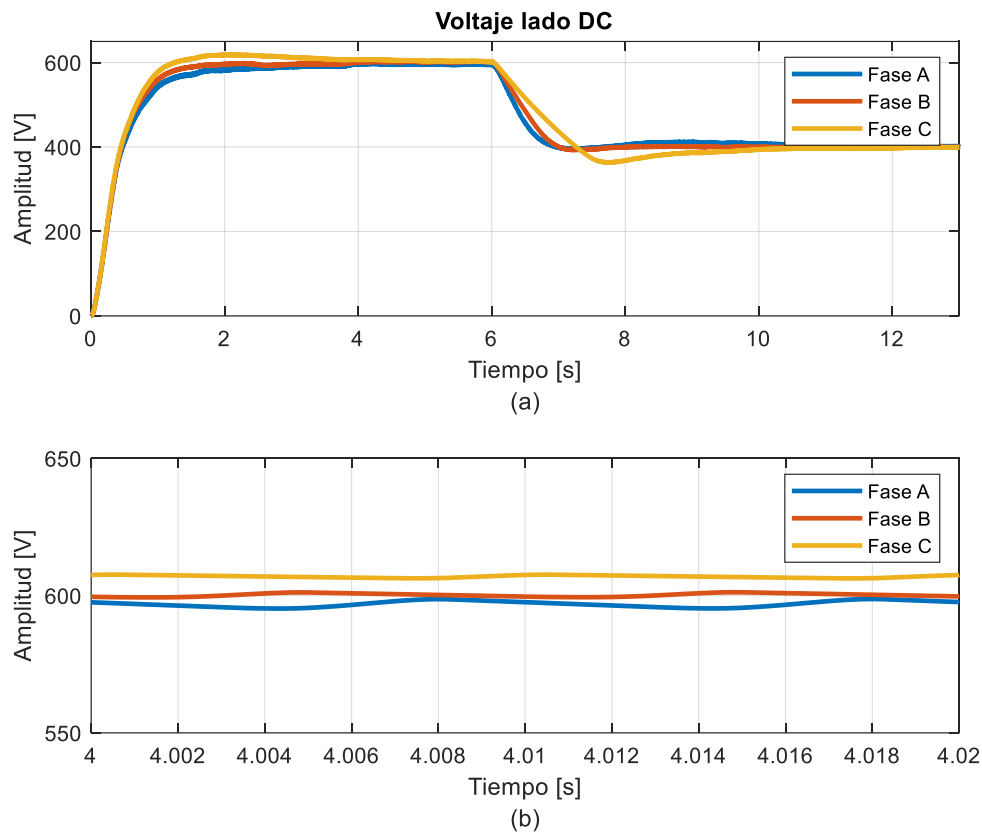


Fig. 26 Voltaje lado DC del sistema hexagonal con variación en la carga

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.26 se puede apreciar el voltaje continuo en cada una de las fases del convertidor hexagonal y cómo las fases, a pesar de tener diferentes valores de carga llegan, a un el equilibrio interno dentro de las ramas del convertidor, para alcanzar los 600 [V] que se demanda. Las principales observaciones son:

- A los 4 [s] el voltaje logra su estado estacionario mientras que a los 600 [v], posteriormente, cuando se genera el impacto de carga a los 6 [s], el voltaje llega nuevamente a un estado estacionario a los 11[s].
- Se puede apreciar que el voltaje de las fases no presenta el mismo comportamiento como en la Fig.17, esto debido a que las cargas que se demandan en cada una de las fases del convertidor son distintas, a pesar de que se conserve la misma demanda de voltaje.

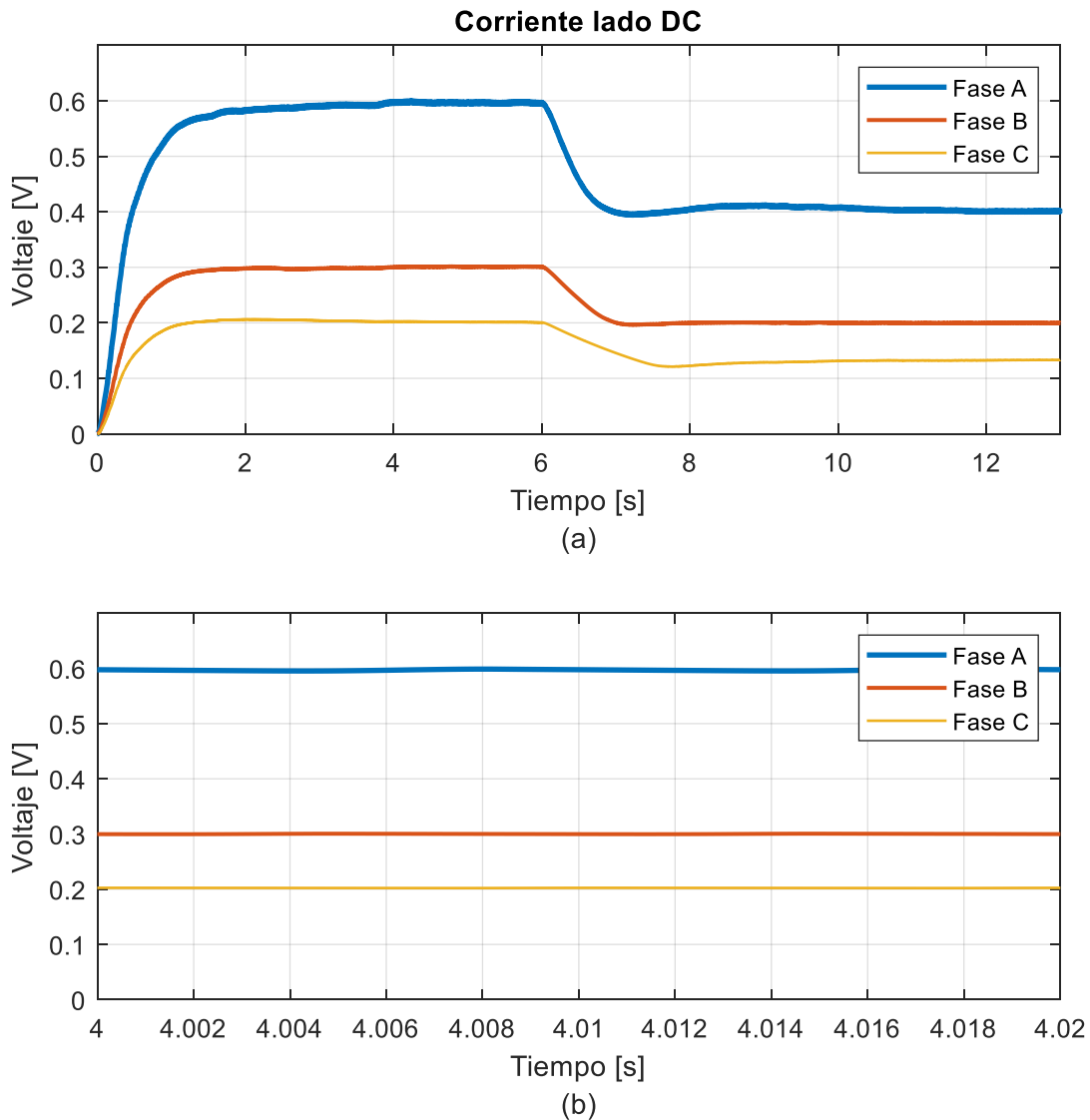


Fig. 27 Corriente DC del convertidor hexagonal

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 27 se puede apreciar el comportamiento de la corriente del convertidor cuando las cargas del sistema son diferentes, en contraste con la Fig.18, donde los valores de la corriente eran iguales en las tres fases. Las principales observaciones son:

- La corriente de la fase A es la que alcanza un mayor valor, alcanzando los 0.6 [A] a 600 [V] y, posteriormente cuando el voltaje decae la corriente toma un valor igual a 0.4[A].
- La corriente de la fase B tiene un valor de corriente igual a 0.3[A] a los 600[V] y, cuando el voltaje decae, se tiene que la corriente toma un valor de 0.2[A].
- La corriente de la fase C, tiene un valor de corriente igual a 0.3[A] a los 600[V] y cuando el voltaje decae, la corriente toma un valor de 0.13[A].

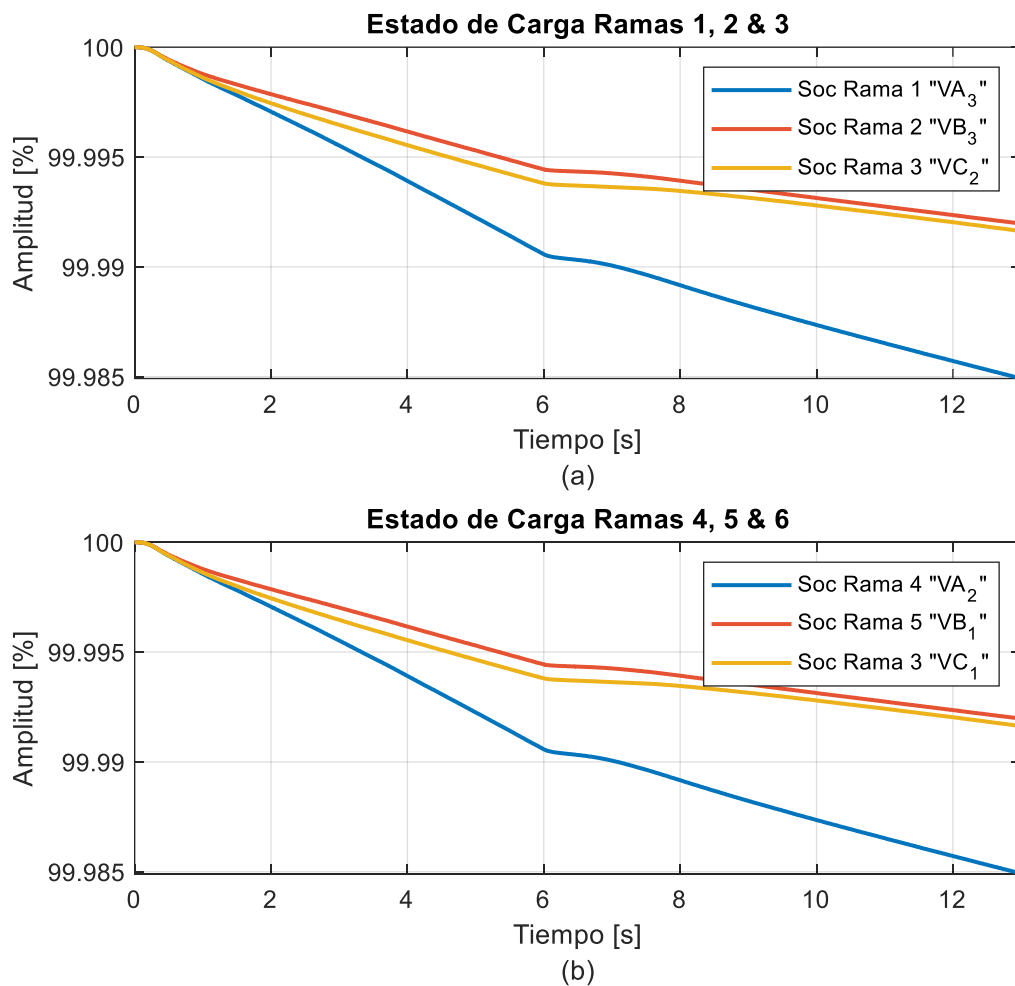


Fig. 28 Estado de carga de las ramas del convertidor hexagonal

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.28 se puede apreciar el estado de carga de las baterías en cada una de las ramas del sistema. A diferencia de la Fig. 21, las baterías no se descargan de manera lineal y de manera uniforme, sino más bien, algunas de las ramas del sistema se descargan antes que otros. Las principales observaciones son:

- Las ramas 1 y 4, que son las que componen la fase $Am - Ap$, son las que tienen la curva de descarga más rápida
- La rama 2 y 5, que conforma la fase $Bm - Bp$, son las que poseen la descarga más lenta del sistema descargándose un 0.01% en los 12 [s] de simulación.
- La fase C, compuesta por las ramas 3 y 6, tiene una descarga mayor que la fase B, pero al mismo tiempo mucho menor que la fase A.

4.2.3 Variación de la tensión

Tabla 4.4. Parámetros del convertidor con variación de tensión

Parámetros	> 4[s]	< 4 [s]
Tiempo de muestreo	10[ms]	
Ctrl. Proporcional	1.0×10^{-5}	
Ctrl. Integrativo	4.0×10^{-3}	
Voltaje Fase A	600 [V]	500[V]
Voltaje Fase B	625 [V]	525[V]
Voltaje Fase C	575 [V]	475[V]
Resistencia Fase A	1000 [Ω]	
Resistencia Fase B	1000 [Ω]	
Resistencia Fase C	1000 [Ω]	
Inductancia fase: A, B & C	10[mH]	
Resistencia Interna	0,1 [Ω]	
Inductancia interna	100 [mH]	

Fuente: Elaboración propia

Los datos para destacar de la tabla 4.4 Son:

- Se conservan los valores del controlador, donde se tiene, por un lado, la parte proporcional, la cual controla el error actual, tomando un valor de 1×10^{-5} y, por otro lado, la parte integrativa, que controla la sumatoria del error durante el tiempo, tomando esta última el valor de 4×10^{-4}
- El valor de los voltajes varía en cada una de las fases del convertidor hexagonal. La fase A parte con un nivel de voltaje de 600 [V] que, posteriormente, decae a 500[V]. La fase B del convertidor tiene un voltaje de 625[V] en la partida y, a los tres segundos, decae, llegando a los 525[V]. La fase C del convertidor parte con un voltaje de 575[V] el que, posteriormente decae llegando a y estabilizándose en los 475[V].
- El valor de la resistencia se mantiene constante en 1000[Ω], en cada una de las fases del convertidor y, la inductancia es igual en cada una de las fases del convertidor.

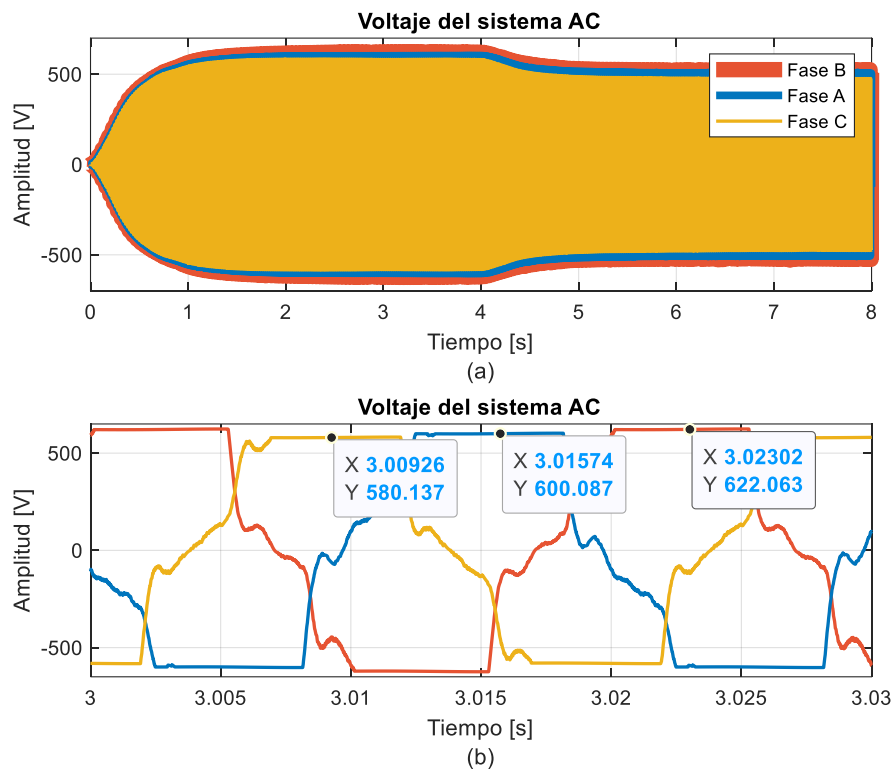


Fig. 29 Voltaje del lado AC del convertidor con variación en el voltaje

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 29 se presenta el voltaje alterno que se obtiene al medir cada una de las fases del lado AC del convertidor hexagonal cuando se varía el valor de la tensión. Entre los parámetros importantes a destacar, se encuentran los siguientes:

- En la Fig. 29(a) se aprecia el comportamiento del voltaje en el tiempo y cómo el voltaje de los valores se distribuye con base en la siguiente dinámica: el voltaje de la fase B es mayor que el voltaje de la fase A y, al mismo tiempo, mayor que el de la fase C.
- La figura 29(b) permite obtener los valores aproximados del voltaje en el modelo simulado, tomando así los siguientes valores: el voltaje en la fase A es de 600.1[V], el voltaje de la fase B es de 622.06[V] y el voltaje de la fase C es de 580.1[V].
- Estas formas de onda permiten entender las formas de onda del lado AC del convertidor de convertidor hexagonal cuando se varía el voltaje de referencia.

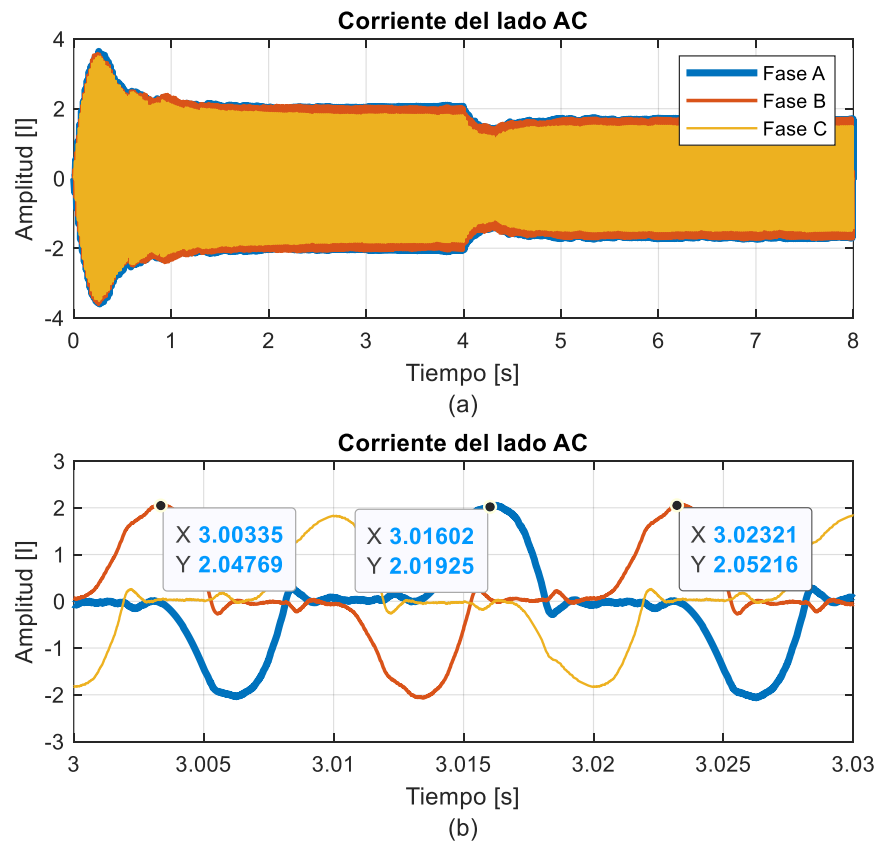


Fig. 30 Corriente de lado AC del convertidor con variación en el voltaje

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 30 se presenta el comportamiento de la corriente del sistema hexagonal cuando varía el voltaje, entendiendo que la carga es de $1000[\Omega]$.

- En la Fig. 30(a) se puede apreciar el valor de la corriente durante 8 [s], donde en el instante de los 4[s] se genera una variación en el voltaje.
- En la Fig.30(b) se aprecian los valores aproximados de la corriente de la topología hexagonal, de manera que en la fase A se tiene una corriente de 2.01[A], en la fase B de 2.04 y en la fase C de 2.05[A].

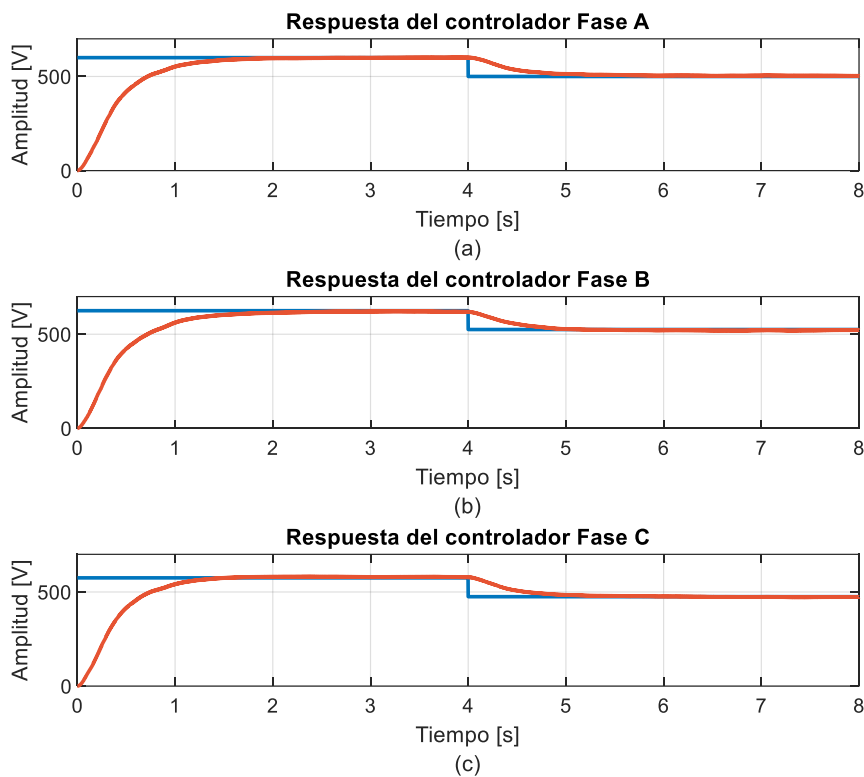


Fig. 31 Respuesta de los controladores ante variación en el voltaje de las fases

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 31 se logra apreciar el comportamiento de los controladores en cada una de las fases. Las principales observaciones son:

- El tiempo de respuesta del controlador a la partida del convertidor hexagonal es menor a los 2 [s] en las tres fases, en cambio, el tiempo de respuesta cuando decae el voltaje en 100[V] es de 1[s].
- En primer lugar, en la Fig. 31(a) se logra apreciar la respuesta del controlador para la fase A, con un voltaje de referencia de 600[V] y, transcurridos 4[s], este valor decae a los 500[V]. En segundo lugar, en la Fig. 31(b) se logra apreciar la respuesta del controlador para la fase B, con un voltaje de referencia de 625[V] y transcurridos 4[s] este valor decae a los 525[V] y, en tercer lugar, en la Fig. 31(c) se logra apreciar la respuesta del controlador para la fase A, con un voltaje de referencia de 575[V] y transcurridos 4[s] este valor decae a los 475[V].
- Al observar los lazos de control, se puede apreciar que el voltaje es diferente en cada una de las fases del convertidor.

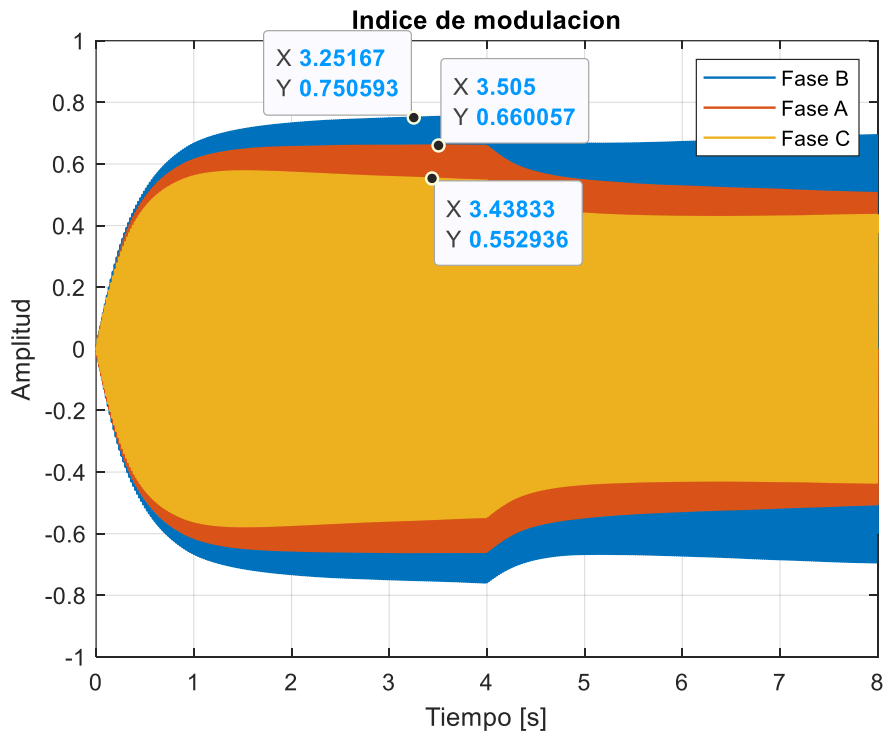


Fig. 32 Índices de modulación del convertidor ante variación en el voltaje de las fases

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.32 se presentan los índices de modulación de cada una de las fases de convertidor y cómo estos varían respecto al tiempo. Los principales puntos para resaltar son:

- En la figura se puede apreciar que los tres índices de modulación son diferentes, debido a que cada una de las fases demanda un valor distinto de voltaje.
- Los índices de modulación de cada una de las fases cambian al instante donde se genera una variación en el voltaje.
- El índice de modulación de la fase B es mayor, ya que esta demanda una mayor cantidad de voltaje que los otros.
- Los índices de modulación de las fases son; el de la fase A es de 0.66, el de la fase B es de 0.75 y el de la fase C es de 0.75.

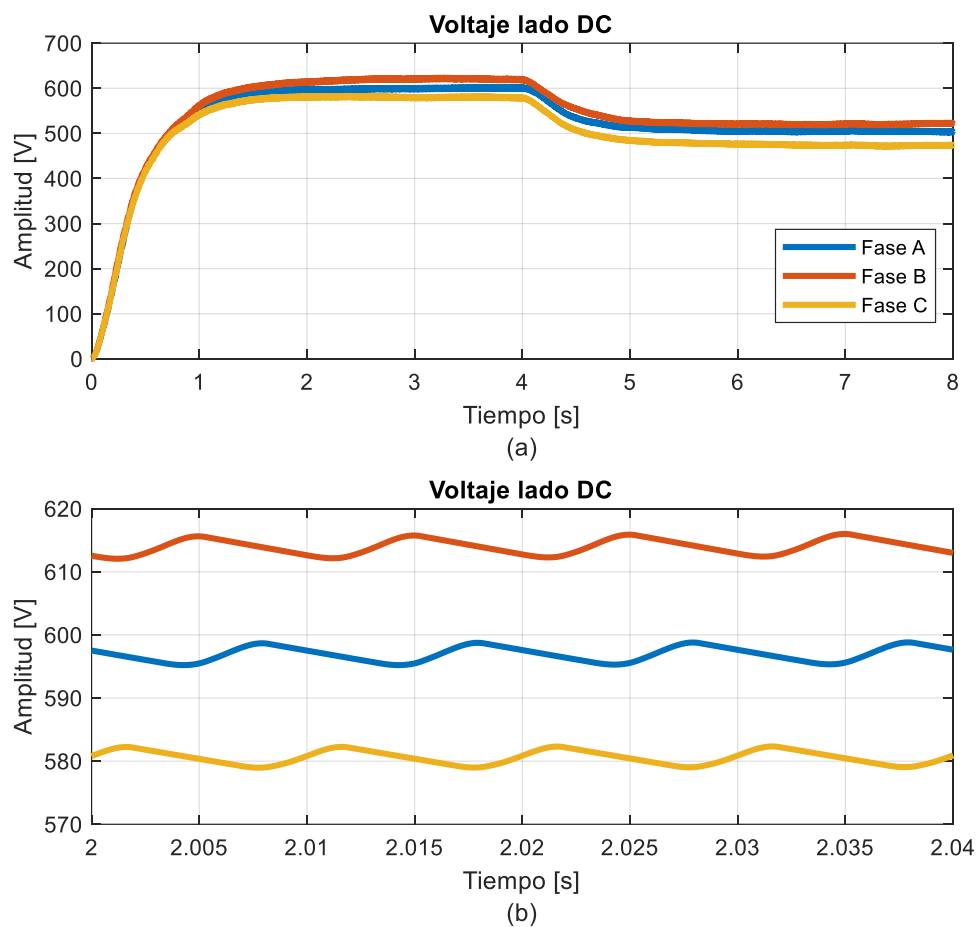


Fig. 33 Voltaje del lado DC del convertidor ante variación en el voltaje de las fases

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.33 se puede apreciar el voltaje continuo de cada una de las fases del convertidor hexagonal y cómo las fases a pesar de tener diferentes valores de voltaje alcanzan un equilibrio. A los 4 [s] el voltaje de las tres fases decae, tomando así tres valores de voltaje diferentes.

- El voltaje de la fase A, la fase B y la fase C tienen una diferencia de 25 [V] entre ellas, y alcanzan su estado estacionario a los 3[s].

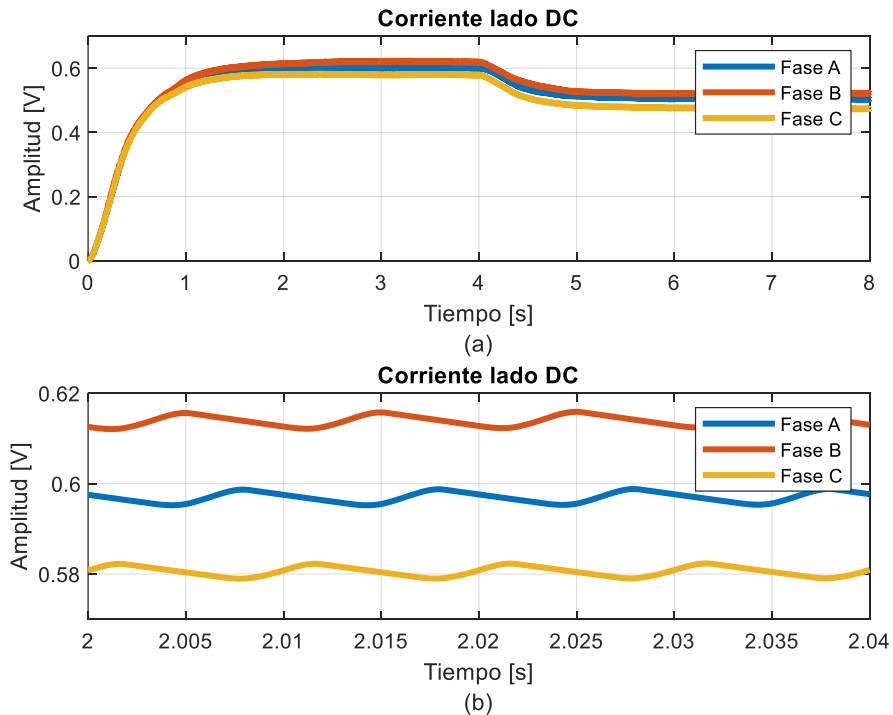


Fig. 34 Corriente del lado DC del convertidor ante variación en el voltaje de las fases

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 34 se puede apreciar el comportamiento de la corriente del convertidor cuando varía el voltaje. Las principales observaciones son:

- La corriente de la fase B es la que alcanza el mayor valor, teniendo un valor de corriente de aproximadamente 0.61[A] con un voltaje de 625[V], la corriente de la fase A tiene un valor de aproximadamente 0.6[A] y la corriente de la fase C es de aproximadamente 0.58[A].
- En la Fig. 24(a) se puede apreciar que la corriente se enfrenta a una variación en el voltaje, la que se adapta de manera de obtener nuevos valores de corriente.

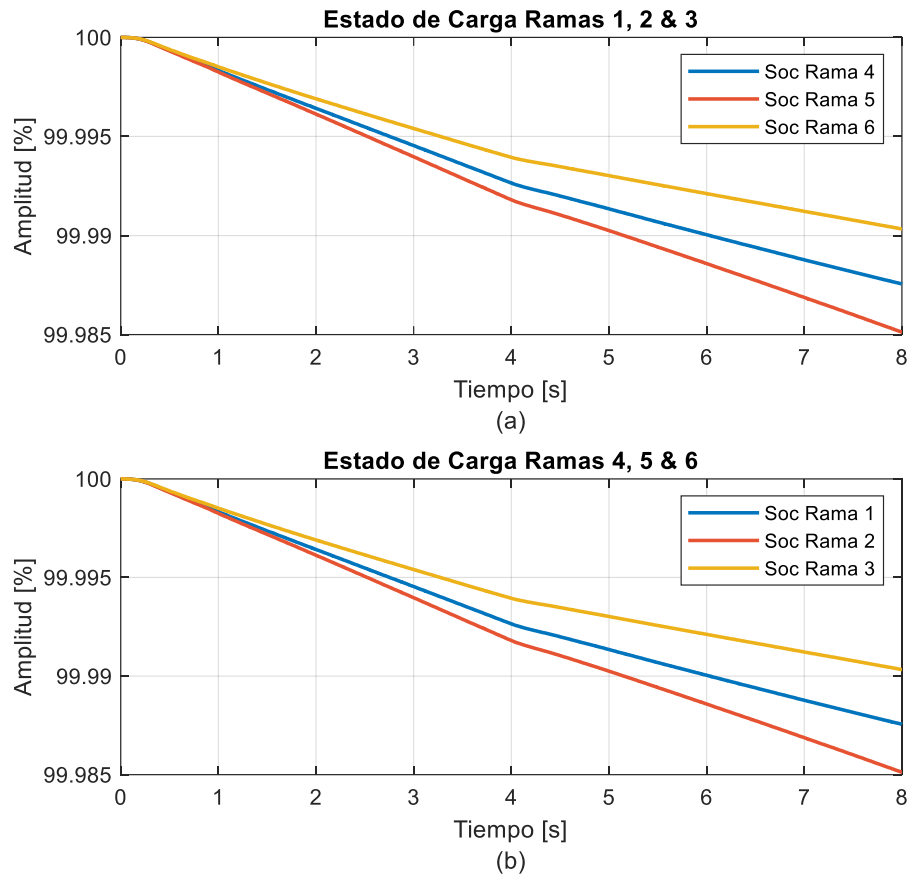


Fig. 35 Estado de carga (SOC) de las baterías ante variación en el voltaje de las fases.

(a)Ramas superiores (b)Ramas inferiores

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 35 se puede apreciar el estado de carga de las baterías en cada una de las ramas de la topología, en contraste con el estado de carga del convertidor cuando las cargas y el voltaje son constantes (Fig.18). Se aprecia que las baterías se descargan de manera lineal, existe una pendiente igual en la descarga de todas las ramas del sistema. Las principales observaciones son

- La pendiente de descarga del convertidor es menor antes de la variación de voltaje en el instante de 4[s].
- La pendiente de descarga de las ramas del convertidor aumenta cuando cambia los voltajes de referencia, generando una descarga más rápida y, provocando de igual manera una diferencia entre las descargas de las baterías.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusiones

La topología hexagonal es flexible, ya que brinda la posibilidad de generar diferentes esquemas y configuraciones.

En este trabajo se propone un convertidor de potencia hexagonal basado en MMSPC para terminales de corriente continua desacoplados. El uso de MMSPC en el sistema permite equilibrar la tensión interna de las diferentes unidades de almacenamiento que se conectan en cada uno del módulo propuesto. Este balance interno se implementa en la etapa de modulación y no necesita ningún sensor adicional o lazo de control extra.

La estrategia de control propuesta permite controlar la tensión de cada uno de los terminales de corriente continua del sistema y, gracias al equilibrio de tensión interno de los módulos MMSPC, es posible lograr el correcto funcionamiento de cada brazo del sistema de potencia hexagonal.

Los resultados de la simulación validan la estrategia de control mediante un controlador PI con un control proporcional con valor 1×10^{-5} y una parte integrativa 4×10^{-4} y el equilibrio de la tensión interna, con el fin de utilizar estos resultados como hito para la implementación del sistema propuesto en aplicaciones como estaciones de carga de vehículos eléctricos o de respaldo.

5.2. Trabajo Futuro

Estudiar la posible extensión del modelo con módulos MMSPC de manera de no tener tan solo el balance por ramas, sino más bien un balance completo del sistema mediante la paralelización de este, con el fin de estimar SOC de las baterías y que entre las baterías no exista una diferencia significativa, a pesar de que existan diferentes impactos de carga.

Implementar esta topología a base de baterías de segundo ciclo de manera de generar el balance interno del sistema.

Optimizar la topología hexagonal presentada, de manera que el sistema sea más eficiente en ámbitos de corriente y voltaje.

Implementar esta topología para corriente continua y con sistemas de almacenamiento, de manera de presentarlo como un sistema de respaldo o de carga

Se propone optimizar los tiempos de asentamiento mediante una estrategia de control como controlador PID o, un control multipunto

Bibliografía

- [1].Ministerio de energías de Chile, “Chile es reconocido como el mejor país para invertir en energía renovable en América”, 2021. [En línea] Disponible en: <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/chile-es-reconocido-como-el-mejor-pais-para-invertir-en-energias-renovables-en-america>. [Accedido: 17-oct-2023]

- [2].Ministerio de Energía de Chile. (2021). “Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile”. Santiago: Ministerio de Energías de Chile. [En línea] Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad_ministerio-de-energia.pdf. [Accedido: 17-oct-2023]

- [3].Z. Li, R. Lizana F., S. Sha, Z. Yu, A. V. Peterchev and S. M. Goetz, "Module Implementation and Modulation Strategy for Sensorless Balancing in Modular Multilevel Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 9, pp. 8405-8416, Sept. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2886147.

- [4].C. Korte, E. Specht, M. Hiller and S. Goetz, "Efficiency evaluation of MMSPC/CHB topologies for automotive applications," 2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 324-330, doi: 10.1109/PEDS.2017.8289145.

- [5].S. M. Goetz, Z. Li, X. Liang, C. Zhang, S. M. Lukic and A. V. Peterchev, "Control of Modular Multilevel Converter with Parallel Connectivity—Application to Battery Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 11, pp. 8381-8392, Nov. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2645884.

- [6].L. Baruschka and A. Mertens, "A New Three-Phase AC/AC Modular Multilevel Converter with Six Branches in Hexagonal Configuration," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 3, pp. 1400-1410, May-June 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2252593.

- [7].P. Li, Y. Wang, G. Philip Adam, D. Holliday and B. W. Williams, "Three-Phase AC–AC Hexagonal Chopper System with Heterodyne Modulation for Power Flow Control Enhancement," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 10, pp. 5508-5521, Oct. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2378018.

- [8].P. Wang, F. Liu, X. Zha, J. Gong, F. Zhu and X. Xiong, "A Regenerative Hexagonal-Cascaded Multilevel Converter for Two-Motor Asynchronous Drive," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 1687-1699, Dec. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2713043.

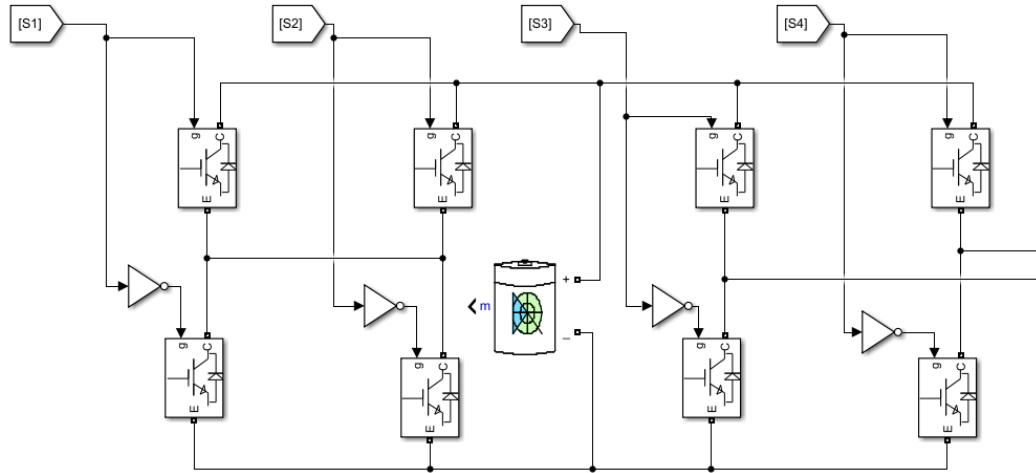
- [9].A. Laka, J. A. Barrena, J. Chivite-Zabalza, M. Á. Rodríguez Vidal and P. Izurza-Moreno, "New Hexagonal Three-Phase Voltage-Source Converter Topology for High-Power Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 1, pp. 30-39, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2327597.

- [10]. C. Zhang, D. Jiang, X. Zhang, J. Chen, C. Ruan and Y. Liang, "The Study of a Battery Energy Storage System Based on the Hexagonal Modular Multilevel Direct AC/AC Converter (Hexverter)," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43343-43355, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2854843.

Anexo A. Simulink

A.1. MMSPC

En este anexo A.1 se presenta un módulo MMSPC con una batería como elemento almacenador de energía

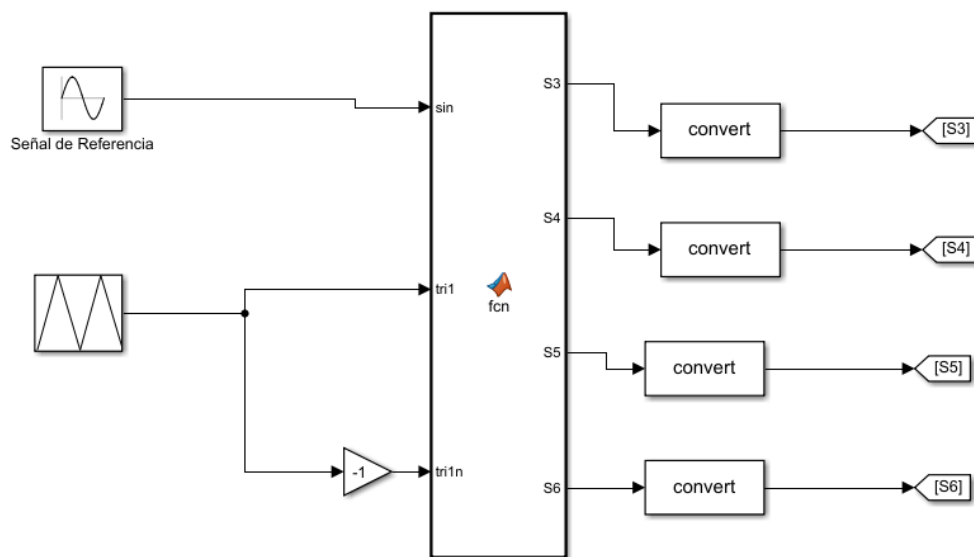


Anexo fig. 1. Módulo MMSPC

Fuente: Elaboración propia

A.1.1 Control de MMSPC

El anexo A.1.1 presenta el lazo de control que se requiere para el funcionamiento de un módulo MMSPC

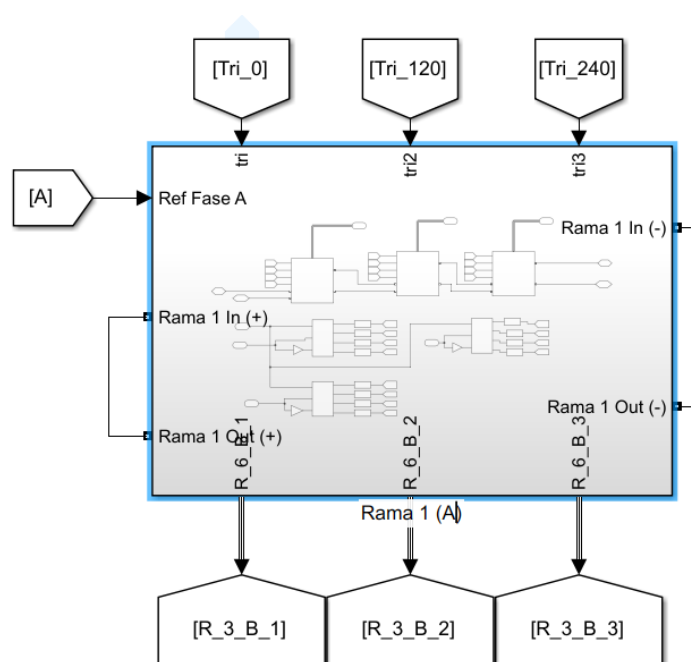


Anexo fig. 2 Control de módulos MMSPC

Fuente: Elaboración propia

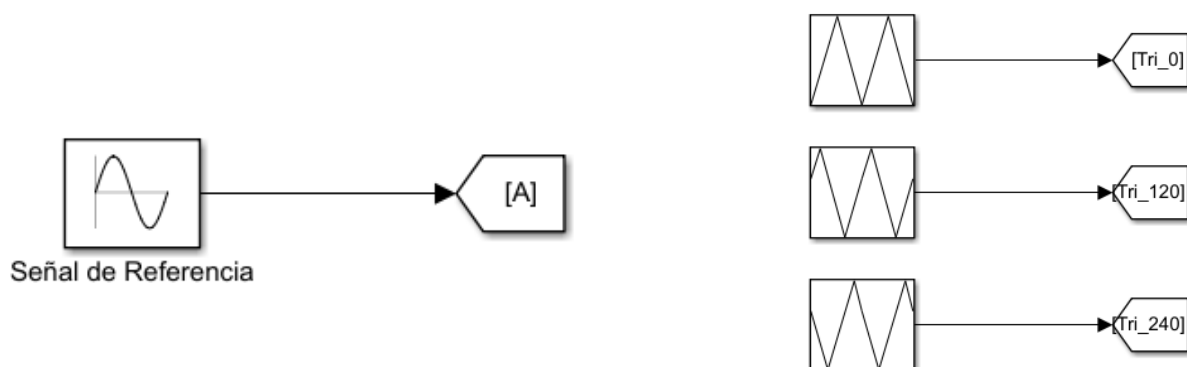
A.2. Rama con módulos MMSPC

En el anexo A.2 se presenta el modelo de una de las ramas del sistema hexagonal, la parte superior ingresan las señales triangulares desfasadas en 120° en la parte superior se obtienen los parámetros de cada una de las baterías que se encuentran en las ramas.



Anexo fig. 3. Rama del sistema hexagonal

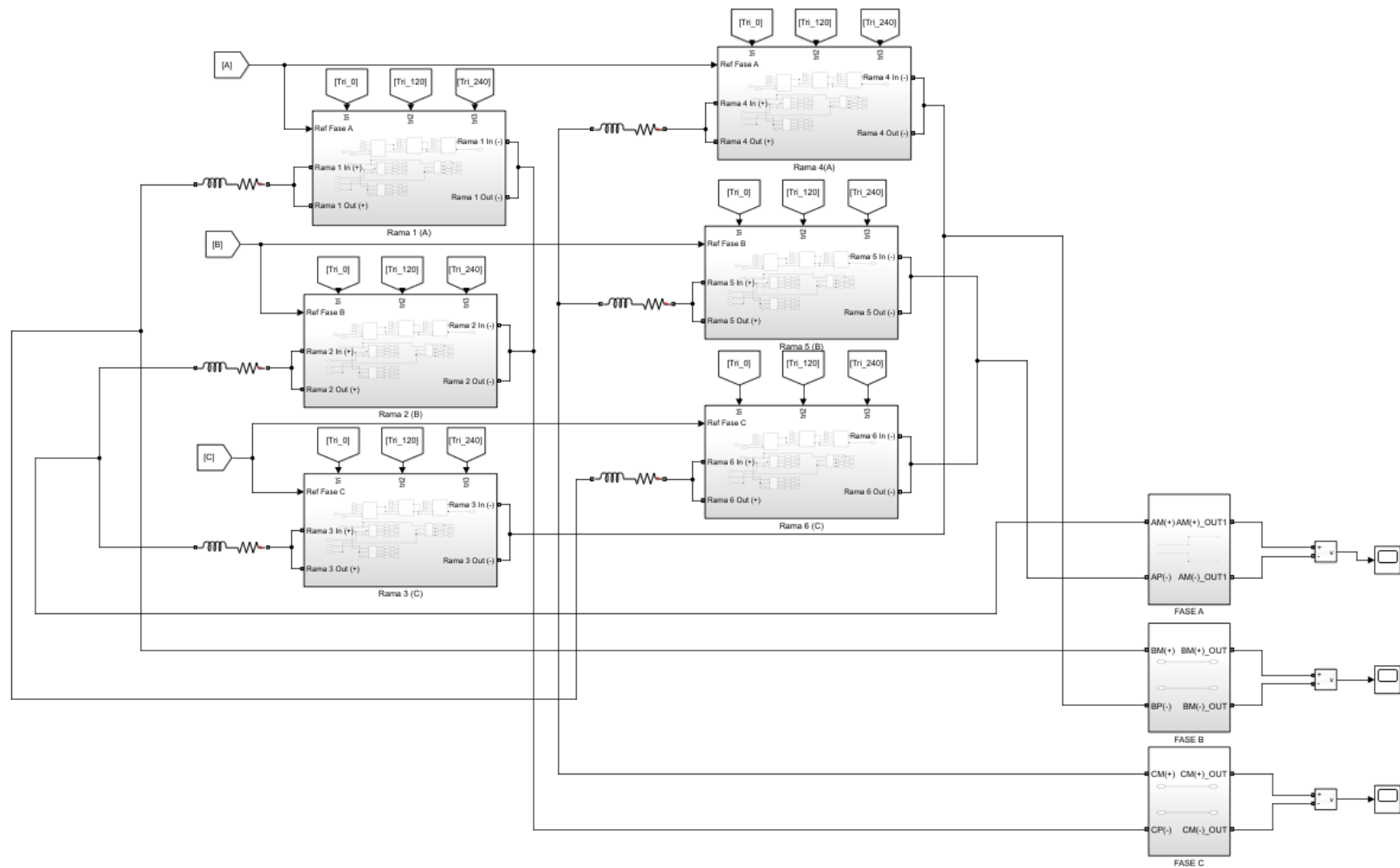
Fuente: Elaboración propia



Anexo fig. 4. Control de red y triangulares

Fuente: Elaboración propia

A.3. Sistema hexagonal



Anexo fig. 5 Sistema hexagonal

Fuente: Elaboración propia

