



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño, análisis y construcción
a escala de un sistema de
almacenamiento de energía
basado en la topología DAB-VSC

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

PRESENTA

Cristóbal Ramírez Ramos

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de tesis con mucho cariño a mi familia y amigos por haberme acompañado durante este trayecto de mi vida, gracias por todo su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, **Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez**, por haberme dado la oportunidad de trabajar con él, por ser un ejemplo para mí y sobre todo por la paciencia y apoyo que me brindó para realizar este trabajo de tesis.

A mis amigos **Alex Albiter, Brayan Alonso y Erick Reynoso** por haberme acompañado durante la carrera, por todo lo que me enseñaron y sobre todo por su valiosa amistad.

A mis compañeros tesisistas **Alfredo Velázquez, Jesús Hernández, Maidier Díaz y Mariana Gutiérrez** por su compañía en laboratorio y por los consejos que me dieron durante el desarrollo de esta tesis.

Un agradecimiento especial a **Alfredo Velázquez** y a **Gabriel Osorio** por contribuir con sus prototipos de convertidores para el desarrollo del experimento.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por todo lo que me brindó y por ser una gran institución con la que me identifico.

Al **Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIT)** de la UNAM, por la beca brindada durante 5 meses bajo el proyecto “Modelado, simulación y construcción a escala de un transformador de distribución híbrido para mejorar índices de calidad de la energía”, con clave DGAPA-PAPIT-TA100718.

Al **Centro Mexicano para la Innovación en Energía del Océano** por el material y apoyo brindado para la elaboración de los prototipos usados en el desarrollo de esta tesis, bajo el proyecto de CONACYT con clave FSE-2014-06-249795.

RESUMEN

Dentro del paradigma de modernización de redes eléctricas, las microrredes se consideran como un paso clave en la conversión de las redes convencionales a redes inteligentes con integración de fuentes de energía renovable de forma distribuida.

A medida que incrementa la penetración de fuentes de energía con naturaleza intermitente en las actuales redes de distribución, su impacto en la estabilidad, confiabilidad, diseño y operación se vuelve cada vez más significativo de atender. En todos estos casos, la regulación continua de voltaje, calidad de la energía y rangos de operación confiables son retos actuales e importantes para los operadores de red en el mundo. Este hecho también engloba a la comunidad académico-científica que, desde distintas áreas del conocimiento, trabajan para lograr un objetivo común, la integración compatible de energía renovable a las redes eléctricas convencionales.

La solución incipiente para contrarrestar las problemáticas generadas en la red eléctrica debido a la incorporación de energías renovables es, sin duda, la instalación de sistemas de almacenamiento de energía, cuya característica de reserva energética aporta importantes ventajas técnicas y económicas en las redes de transmisión y distribución.

En este trabajo de tesis de Ingeniería Eléctrica, se presenta el diseño, modelado y construcción a escala de un sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS) de mediana y baja potencia, el cual se integra a redes de distribución con generación distribuida, concretamente generación eólica y solar, con el propósito de analizar su operación y poder dar sustento a las ventajas operativas que este sistema puede aportar. La particularidad de este sistema radica en la utilización de dos convertidores de electrónica de potencia, el doble puente activo (DAB) como convertidor CD/CD y el convertidor por fuente de voltaje (VSC) como convertidor CD/CA, para el control independiente de las diferentes variables dinámicas que caracterizan a una red eléctrica, como la tensión y la corriente. Este sistema permite el flujo bidireccional de potencia, de modo que puede almacenar energía cuando la generación es mayor que la demanda y suministrar energía cuando ocurre el caso contrario.

De las diferentes funciones del BESS, se analizan cuatro en particular dentro de este trabajo de tesis, las cuales son: i) reducción del pico de demanda, ii) corrección del factor de potencia, iii) regulación de voltaje y iv) operación en modo aislado.

Los análisis de las simulaciones y la construcción a escala del prototipo en comparación con las distintas técnicas reportadas en la literatura científica demuestran el potencial tecnológico de este diseño, así como las ventajas técnicas en redes eléctricas de distribución con generación distribuida.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Concepto general de un sistema de almacenamiento de energía	4
1.2 Ejemplos de almacenamiento de energía en el mundo con sistemas BESS.....	4
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Hipótesis	6
1.5 Metodología	6
1.6 Objetivos	7
1.7 Justificación	8
1.8 Contribución de la tesis	8
2. ELECTRÓNICA DE POTENCIA EN REDES ELÉCTRICAS	9
2.1 Tipos de sistemas de almacenamiento de energía	10
2.1.1 Baterías.....	10
2.1.2 Supercapacitores	11
2.1.3 Volantes de inercia	12
2.1.4 Bombeo hidráulico	12
2.1.5 Aire comprimido	13
2.2 Comparación de los sistemas de almacenamiento de energía	14
2.3 Electrónica de potencia aplicada a los sistemas BESS	15
2.4 Análisis de topologías en el estado del arte	15
2.4.1 Sistema de baterías con Convertidor VSC	16
2.4.2 Sistema de baterías con Convertidor Buck-Boost y VSC	17
2.4.3 Sistema de baterías con Convertidor Buck-Boost Triple y VSC	17
2.4.4 Sistema de baterías con Convertidor Celdas en Cascada	18
2.4.5 Sistema de baterías con Convertidor Modular Multinivel	19

2.4.6 Sistema de baterías con Convertidor DAB y VSC	20
2.4.7 Resumen de características	21
3. MODELADO DE UN BESS	22
3.1 Modelo de la batería	22
3.2 Modelo del doble puente activo (DAB).....	24
3.2.1 Funciones de conmutación	26
3.2.2 Modulación SPSC ($D_\mu = 0$ y $0 \leq \phi_D \leq \frac{\pi}{2}$)	28
3.2.3 Modelo de planta del DAB	29
3.2.4 Prueba de lazo cerrado	31
3.3 Modelo del VSC de seis pulsos	34
3.3.1 Principio de operación	34
3.3.2 Control de potencia activa y reactiva por corrientes	36
3.3.3 Regulación de voltaje de CD	41
3.4 Operación en conjunto del BESS	44
3.4.1 Simulación	47
4. INTEGRACIÓN DEL BESS A UNA MICRORRED	50
4.1 Definición de Microrred	50
4.2 Implementación del BESS	51
4.2.1 Análisis paramétricos	51
4.3 Caso I. Reducción del pico de la demanda	53
4.4 Caso II. Corrección del factor de potencia	55
4.5 Caso III. Regulación del perfil de voltaje	57
4.6 Caso IV. Corrección del factor de potencia y regulación de voltaje	59
4.7 Caso V. Operación en modo aislado	61
4.8 Conclusiones particulares	64

5. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

5.1 Prototipo del DAB	65
5.2 Prototipo del VSC	67
5.3 Prototipo del BESS	68

6. CONCLUSIONES

6.1 Aportes	71
6.2 Trabajos futuros	72
6.3 Discusión	74
6.3 Conclusiones	74

Índice de Figuras

Fig. 1-1 Sistema de almacenamiento de energía, CrystEna.....	4
Fig. 1-2 Sistema de almacenamiento de energía en Kaua'i.....	5
Fig. 1-3 BESS acoplado a la red.....	7
Fig. 2-1 Batería electrolítica.....	11
Fig. 2-2 Super condensador para auto eléctrico.....	11
Fig. 2-3 Volante de inercia.....	12
Fig. 2-4 Esquema de una central de bombeo hidráulico.....	13
Fig. 2-5 Esquema de almacenamiento por aire comprimido.....	13
Fig. 2-6 Sistema de baterías con Convertidor VSC.....	16
Fig. 2-7 Sistema de batería con Convertidor Buck-Boost y VSC.....	17
Fig. 2-8 Sistema de baterías con Convertidor Buck-Boost Triple y VSC.....	18
Fig. 2-9 Sistema de baterías con Convertidor Celdas en Cascada.....	19
Fig. 2-10 Sistema de baterías con Convertidor Modular Multinivel.....	19
Fig. 2-11 Sistema de baterías con Convertidor DAB y VSC.....	20
Fig. 3-1 Modelo equivalente de una batería.....	22
Fig. 3-2 Topología del convertidor DAB.....	25
Fig. 3-3 Proceso de Modulación del DAB.....	26
Fig. 3-4 Circuito equivalente del convertido DAB.....	27
Fig. 3-5 Modulación SPCS ($D_{\mu} = 0$).....	29
Fig. 3-6 Modelo de planta y compensador del DAB.....	30
Fig. 3-7 Control de Lazo Cerrado.....	32
Fig. 3-8. Dinámicas de lazo cerrado para cambios de potencia escalonados.....	33
Fig. 3-9 Convertidor VSC Trifásico de Seis Pulsos, conectado a la red.....	34
Fig. 3-10 Modelo promediado de un convertidor VSC de seis pulsos.....	36
Fig. 3-11 Diagrama esquemático del control de potencia de un convertidor trifásico VSC.....	37
Fig. 3-12 Control de corriente del VSC.....	39
Fig. 3-13 Diagrama a bloques del control de potencia.....	40
Fig. 3-14 Respuesta del VSC para el control de potencia.....	41
Fig. 3-15 Diagrama esquemático del control de voltaje de un convertidor trifásico VSC.....	41
Fig. 3-16 Diagrama a bloques del control de voltaje.....	43
Fig. 3-17 Respuesta del VSC para el control de voltaje.....	44
Fig. 3-18 Diagram a bloques del BESS.....	45
Fig. 3-19 Diagram de conexión del BESS a la red.....	45
Fig. 3-20 Curvas de voltaje en la batería.....	46
Fig. 3-21 Demanda de potencia residencial.....	46
Fig. 3-22 Red con BESS fuera de operación.....	47
Fig. 3-23 Red con BESS en operación.....	47
Fig. 3-24 Señales de control.....	48
a) Desplazamiento de fase, b) Magnitud de las moduladoras, c) Fase de las moduladoras	
Fig. 3-25 Variables promediadas del BESS.....	48
a) Potencia de entrada y salida del DAB, b) Perfiles de tensión en el nodo de CD, c) Potencia activa y reactiva en el nodo de conexión del BESS	
Fig. 3-26 Corrientes en el BESS.....	49
a) Corrientes en las terminales del DAB, b) Corriente en la impedancia del transformador de alta frecuencia, c) Corrientes en las terminales de CA del VSC, d) Ángulo de fase de las corrientes en las terminales de CA del VSC	
Fig. 4-1 Microrred con diferentes tipos de cargas y sistemas BESS.....	52

Fig. 4-2 <i>Curvas de demanda de potencia</i>	52
<i>a) Demanda residencial, b) Demanda comercial, c) Demanda industrial</i>	
Fig. 4-3 <i>Caso I. Red sin BESS</i>	54
Fig. 4-4 <i>Caso I. Red con BESS</i>	55
Fig. 4-5 <i>Caso II. Red sin BESS</i>	56
Fig. 4-6 <i>Caso II. Red con BESS</i>	56
Fig. 4-7 <i>Caso III. Red sin BESS</i>	58
Fig. 4-8 <i>Caso III. Red con BESS</i>	58
Fig. 4-9 <i>Caso IV. Red sin BESS</i>	60
Fig. 4-10 <i>Caso IV. Red con BESS</i>	60
Fig. 4-11 <i>Inyección de potencia FV</i>	61
Fig. 4-12 <i>Red de distribución con BESS y sistemas FV</i>	61
Fig. 4-13 <i>Caso V. Red sin BESS</i>	63
Fig. 4-14 <i>Caso V. Red con BESS</i>	63
Fig. 5-1 <i>CREE Kit</i>	65
Fig. 5-2 <i>TI c2000</i>	65
Fig. 5-3 <i>Voltajes en el DAB</i>	66
Fig. 5-4 <i>Corrientes en el DAB</i>	66
Fig. 5-5 <i>Curvas características del prototipo del VSC</i>	67
<i>a) Voltajes trifásico después del filtro, b) voltajes trifásicos antes del filtro, c) señales moduladoras</i>	
Fig. 5-6 <i>Filtro de segundo orden</i>	67
Fig. 5-7 <i>Prototipo del BESS</i>	69
Fig. 5-8 <i>Variables del DAB en el BESS</i>	69
Fig. 5-9 <i>Voltajes del VSC en el BESS</i>	69

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Características técnicas de los SAE.....	14
Tabla 2-2 Resumen de características de las topologías del BESS.....	21
Tabla 3-1 Atributos principales de las baterías más representativas.....	23
Tabla 3-2 Funciones de conmutación para el control del puente-H.....	26
Tabla 3-3 Estados topológicos para la modulación SPSC.....	28
Tabla 3-4 Modelos matemáticos para la modulación SPSC.....	29
Tabla 3-5 Parámetros para el diseño de convertidores DAB.....	31
Tabla 4-1 Cargas en la microrred.....	51
Tabla 4-2 Voltajes en las cargas.....	51

Acrónimos

BESS:	Battery Energy Storage System (Sistema de almacenamiento de energía con baterías).
CD:	Corriente directa.
CA:	Corriente alterna.
DAB:	Dual Active Bridge (Doble Puente active).
FV:	Fotovoltaico.
FACTS:	Flexible AC Transmission System (Sistemas de transmisión flexible de AC).
HVDC:	High Voltage Direct Current (Alto voltaje de corriente directa).
I_{DZ} :	Corriente en la inductancia parásita del transformador de alta frecuencia.
IGBT:	Isolated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolar de compuerta aislada).
P:	Potencia activa.
P_{CD} :	Potencia de corriente directa.
PLL:	Phase Locked Loop.
P_{ref} :	Potencia activa de referencia.
PWM:	Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso).
Q:	Potencia reactiva.
Q_{ref} :	Potencia reactiva de referencia.
SAE:	Sistema de Almacenamiento de Energía.
SPSC:	Single Phase Shift Control (Control de cambio monofásico).
V_{bat} :	Voltaje en la batería.
V_{DZ} :	Voltaje en la impedancia del transformador de alta frecuencia.
V_{H1} :	Voltaje en el primer puente H.
V_{H2} :	Voltaje en el Segundo puente H.
VSC:	Voltage Source Converter (Convertidor de fuente de voltaje).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas, ha sido evidente el incremento en la participación de las energías renovables dentro de las redes eléctricas en todos los niveles de potencia, un hecho principalmente impulsado por necesidades ambientales, la creciente demanda energética, así como el costo/beneficio que día a día ofrecen las energías renovables. La suma de dichas acciones tiende a cambiar el paradigma de la generación tradicional centralizada a partir de fuentes fósiles a modernas formas de generación distribuida o descentralizada basada en la integración de fuentes de energía renovable a menor escala [1].

En este contexto, se sabe que la energía eléctrica que llega hasta los usuarios residenciales, comerciales e industriales, es proveniente de enormes y sofisticados sistemas de generación y transmisión, donde dichos sistemas mantienen una relación equilibrada entre el consumo y el suministro. En otras palabras, debe existir un balance continuo en tiempo real entre la generación y la demanda todo el día, todos los días. Por lo tanto, es posible deducir que la incorporación paulatina de fuentes de energía renovable contribuye a reducir problemáticas ambientales, pero de forma inherente, estas tecnologías pueden considerarse como elementos de perturbación en los sistemas convencionales de redes eléctricas, debido a la naturaleza intermitente, y en ocasiones impredecible, de las fuentes de energía [2] que generan, a diferentes niveles de tensión y potencia, una serie de problemáticas de inestabilidad, que pueden ser de voltaje [3][4] y, a mayor escala, de frecuencia [5].

Dentro de las diferentes propuestas que existen para contrarrestar los problemas de inestabilidad en la red, debidos a la incorporación de fuentes de energía renovable, es sin duda la instalación de sistemas de almacenamiento de energía. Al contar con la característica de flujo bidireccional de potencia, los sistemas de almacenamiento pueden inyectar y absorber potencia de la red, logrando ventajas técnicas y económicas en los sistemas de transmisión y distribución, como [6]:

- Optimización de la integración de energías renovables e incremento de eficiencia de la generación existente.

- Soporte de estabilidad de voltaje, (regulación Volt/VAR).
- Reducción de problemas de congestión o saturación en líneas y transformadores.
- Reducción de la necesidad de instalar nuevas plantas de generación.
- Soporte a la estabilidad de frecuencia.
- Amortiguador de precios, suministrando las reservas cuando las tarifas eléctricas se incrementen.
- Mejora a la calidad de la energía.
- Balanceo de potencia trifásica.

Dependiendo de las características y necesidades de cada red eléctrica donde sea necesario instalar un sistema de almacenamiento, es posible realizar una primera clasificación de este tipo de tecnologías como: i) almacenamiento masivo usado nivel transmisión (GW), ii) almacenamiento a nivel generación distribuida, para atender los picos locales (MW) y iii) almacenamiento a nivel usuario para la mejora de calidad de la energía (kW). Cada uno requiere de estudios técnicos específicos de aplicación como impacto ambiental, flujos de potencia, análisis de corto circuito, densidad de potencia y viabilidad económica para su instalación [7].

Hoy en día la forma más común de almacenamiento de energía a nivel transmisión, se realiza con las centrales hidroeléctricas. Dicha técnica ha logrado satisfacer algunas necesidades en la operación de la red, pero actualmente la factibilidad en la implementación de más centrales de bombeo tiende a decaer, debido a las siguientes características: i) insuficiente capacidad para satisfacer la demanda energética actual, ii) limitación y grandes dimensiones de infraestructura en los sitios montañosos requeridos para el intercambio de volumen/altura, iii) alteración de los ciclos hídricos, debido a los efectos del cambio climático [8]-[10].

Sin embargo, en la actualidad debido a los avances tecnológicos en la electrónica de potencia y elementos de almacenamiento electroquímico por baterías, existe la posibilidad de realizar dicha tarea a menor escala, con sistemas de conversión flexibles, de bajo costo y robustos, de modo que es posible tener una mayor cantidad de pequeños sistemas de almacenamiento distribuidos a lo largo de la red eléctrica. Lo cual, sin duda, favorece la

descentralización energética, sustituyendo a los sistemas de grandes dimensiones en ciertos puntos específicos [11].

Por lo anterior, las tendencias tecnológicas de almacenamiento en la red eléctrica ahora apuntan a sistemas de pequeña y mediana escala como los sistemas de almacenamiento por baterías, mejor conocidos como BESS (Battery Energy Storage System), los cuales usan baterías de plomo o algunas más modernas como las de iones de litio (ion-Li), junto a una o más etapas de acondicionamiento de energía por medio de convertidores de electrónica de potencia. Actualmente los BESS se encuentran dentro de los sistemas más utilizados debido a su alta eficiencia, la cual está aproximadamente entre el 95-98%, gran velocidad de respuesta, no producen emisiones nocivas y requieren de un bajo mantenimiento debido a que no tienen partes mecánicas móviles [12].

Hoy en día no existe una única tecnología capaz de satisfacer todos los requerimientos de almacenamiento de la red actual, por lo cual, una línea de exploración científica y tecnológica importante en el área de ingeniería eléctrica-electrónica es analizar las capacidades de diferentes estructuras y topologías de electrónica de potencia empleadas en el almacenamiento de energía, resaltando cuál de estas logra abarcar una serie de características a baja y mediana escala de potencia como:

- Flujo de potencia bidireccional.
- Modularidad.
- Alta flexibilidad entre los niveles de tensión de las baterías y la red eléctrica.
- Alta capacidad de carga/descarga.
- Alta eficiencia.
- Alta densidad de potencia.

Lo cual se puede realizar evaluando inicialmente algunos arreglos topológicos reportados en la literatura científica y posteriormente seleccionar un arreglo estándar. De forma subsecuente es necesario analizar el comportamiento, capacidades y ventajas de los sistemas BESS en una microrred, considerando diferentes curvas de demanda y la integración de fuentes de energía renovable.

1.1 Concepto general de un sistema de almacenamiento de energía

Un Sistema de Almacenamiento de Energía (SAE) es cualquier dispositivo que permite conservar la energía, en alguna de sus formas, para que posteriormente pueda ser utilizada en el momento que se requiera, ya sea en la misma forma energética o en otra diferente [13].

La tendencia del uso de fuentes renovables favorece la investigación y el desarrollo de los sistemas de almacenamiento, ya que no se puede hablar de ambos conceptos de forma independiente. Esto se debe al comportamiento errático e intermitente de las fuentes renovables, que no podrían suministrar potencia de forma controlada sin hacer uso de un sistema de almacenamiento de energía, a modo que se pueda satisfacer la demanda instantánea [14].

1.2 Ejemplos de almacenamiento de energía en el mundo con sistemas BESS

En New Jersey, EE. UU., se utiliza un sistema de almacenamiento de energía de 1 MW a base de baterías de ion-Li, llamado CrystEna. Este proyecto es desarrollado por Hitachi, una empresa que se ha enfocado en expandir la capacidad de regulación de potencia en redes eléctricas a partir de dispositivos BESS. En un solo contenedor se tienen 1620 baterías de ion-Li, que pueden almacenar hasta 1 MW. El sistema se muestra en la **Fig. 1-1**.



Fig. 1-1 Sistema de almacenamiento de energía, CrystEna.

Otro ejemplo de almacenamiento de energía a mediana escala con baterías se da en las islas de Kaua'i, en el archipiélago de Hawai. Ahí se utiliza un sistema de 2000 baterías de ion-Li, de 1.5 MW que se acopla a una granja fotovoltaica de 3 MW para proveer a la isla

un suministro de energía más confiable. El nivel de voltaje al que trabajan los bancos de batería del sistema es 480 V, que posteriormente es elevado a 12 kV y transmitido a una subestación para la distribución de la energía. El sistema se muestra en la **Fig. 1-2**.



Fig. 1-2 Sistema de almacenamiento de energía en Kaua'i.

Así como los ejemplos anteriores, existen otros sistemas BESS instalados en el mundo, por mencionar algunos de ellos se tiene:

- ABB en Suiza; sistema BESS de 1.5 MW con baterías ion-Li [15].
- ABB en Inglaterra; sistema BESS de ocho pilas de 200 kW, cada una con trece baterías de ion-Li [15].
- Proyecto en Ballart Australia; instalación de un sistema BESS de 30 MW compuesto por nueve bancos de baterías de ion-Li [16].

Con base en lo anterior, es posible deducir que el estudio y aplicación de sistemas BESS en las redes eléctricas de México representa hoy en día un tópico interesante de investigación y desarrollo tecnológico.

1.3 Planteamiento del problema

Actualmente, en los sistemas eléctricos emergentes basados en generación distribuida, debido a los eventos de cambio de producción eléctrica y las variaciones eólicas y de radiación solar en conjunto con las curvas de demanda industrial, comercial y residencial, pueden generar efectos técnico adversos en los equipos de una red eléctrica. Dichos efectos pueden clasificarse como cambios de magnitud de voltaje, saturación de líneas de transmisión y distribución y variaciones en frecuencia.

1.4 Hipótesis

Los requerimientos que trae consigo la modernización de las redes eléctricas de transmisión y distribución, demandan sistemas de conversión de energía capaces de mejorar la flexibilidad de los sistemas eléctricos y de mantener características favorables como alta eficiencia, alta densidad de potencia y flujo bidireccional. Todo ello deseable en una red regida por los principios de generación distribuida y redes inteligentes. Bajo este escenario la combinación topológica del convertidor DAB en conjunto con el convertidor VSC, tienen el potencial suficiente para cumplir con los requerimientos antes mencionados, representando así una tecnología óptima para el desarrollo de un BESS.

1.5 Metodología

La metodología a seguir para lograr los objetivos y metas planteadas en este proyecto de tesis de ingeniería, se detallan a continuación en orden progresivo.

Análisis del estado del arte: Con base en tópicos relacionados al diseño y operación de sistemas de almacenamiento de energía, considerando modelos de conmutación, se realizará una revisión a fondo de bibliografía actual relevante. La finalidad de esto es obtener un respaldo teórico sobre la forma de operación común de un sistema de almacenamiento de energía como componente de la red eléctrica, así como las diferentes soluciones de controladores internos para lograr su aplicación en niveles de voltajes y potencias conservando siempre los atributos de funcionalidad deseados.

Modelado y simulación: En esta etapa se trabajará en el desarrollo de los modelos matemáticos de los convertidores de electrónica de potencia, a fin de obtener un respaldo matemático que represente las principales características del sistema, incluyendo los componentes de conmutación y controles implementados.

Con el respaldo teórico matemático, se procederá a evaluar la operación y funcionalidad cuantitativa del BESS propuesto mediante una serie de simulaciones en la plataforma Matlab-Simulink. Se llevarán a cabo diferentes casos de estudio típicos de un sistema de almacenamiento de energía, en el entorno de una microrred.

Construcción a escala: Con la experiencia adquirida en la etapa de modelado y simulación, se procederá a realizar la construcción de los convertidores de electrónica de potencia DAB y VSC con base en submódulos de medio puente formados por dispositivos Mosfets de Carburo de Silicio. Lo anterior con la finalidad de comprobar de forma experimental las etapas de control y modulación PWM y SPWM necesarias para conversión de energía CD/CD y CD/CA, operando desde una batería de 12V, hasta un puerto de CA trifásico de $220 V_{RMS}$, con la disposición de los elementos como se muestra en la **Fig. 1-3**.

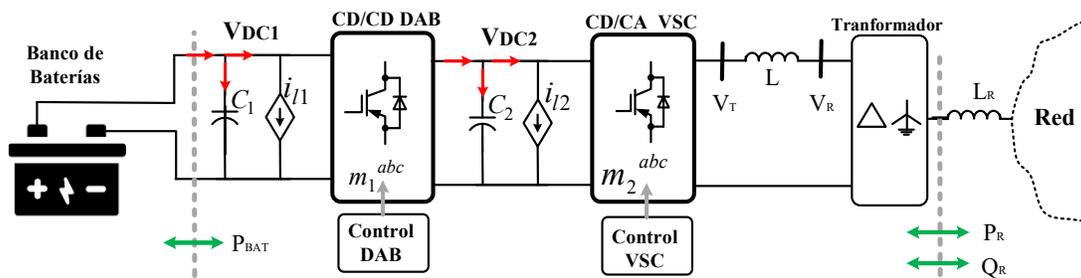


Fig. 1-3 Sistema BESS con estructura DAB-VSC acoplado a la red.

1.6 Objetivos

General. - Realizar un estudio en el área de ingeniería eléctrica con base en el diseño, análisis y construcción de un sistema de almacenamiento de energía con baterías, conjugando las mejores características de los convertidores de electrónica de potencia DAB y VSC.

Técnicos. – Demostrar que a partir del sistema BESS propuesto y construido, que es posible generar intercambios de potencia activa y reactiva en una microrred, a fin de mejorar sus condiciones de operación.

Particulares. – Demostrar específicamente las siguientes capacidades:

- Reducción el pico de demanda.
- Corrección el factor de potencia.
- Regulación de voltaje. (Volt/VAR)
- Operación en modo aislado.

1.7 Justificación

Dentro del contexto de microrredes, es posible relacionar a los dispositivos de almacenamiento de energía y su interfaz electrónica como elementos clave que permitirán alcanzar ventajas operativas, que en años anteriores eran difíciles de lograr. Actualmente, gracias al progreso tecnológico, las capacidades de los materiales y dispositivos semiconductores y las plataformas de procesamiento computacional, es posible identificar a los BESS como elementos claves e indispensables en las futuras microrredes y redes de transmisión y distribución.

Por lo anterior, estas tecnologías representan hoy un tópico muy importante de investigación a nivel ingeniería y posgrado, a fin de superar varios de sus retos técnicos actuales y realizar su implementación en redes eléctricas.

1.8 Contribuciones de la tesis

- Desarrollo de los modelos conmutados y promediados de un sistema BESS haciendo uso de las topologías VSC y DAB en plataforma Simulink.
- Demostración de las capacidades del BESS en una microrred, bajo los siguientes casos de estudio: i) reducción del pico de la demanda, ii) regulación de voltaje Volt/VAR, iii) corrección del factor de potencia, y iv) funcionamiento en modo aislado y casos mixtos.
- Participación en el congreso CINERGIA UG y V Escuela de Verano de Potencia con el artículo “Diseño y modelo de un sistema de almacenamiento de energía basado en topología DAB-VSC” en modalidad póster.
- Construcción, en laboratorio, de un prototipo a escala del BESS propuesto.

CAPÍTULO 2

ELECTRÓNICA DE POTENCIA EN REDES ELÉCTRICAS

La electrónica de potencia es una rama de la ingeniería eléctrica que se encarga de la conversión eficiente de energía eléctrica, adecuando los parámetros eléctricos característicos de las redes a través de dispositivos electrónicos [17].

El desarrollo de los nuevos sistemas de potencia y la modernización de las redes eléctricas convencionales se da gracias a la electrónica de potencia, que durante los últimos años ha penetrado en muchas aplicaciones industriales como sistemas de energía renovable, vehículos eléctricos, sistemas de transmisión de alto voltaje en corriente directa (HVDC), dispositivos FACTS en redes de alto voltaje de corriente alterna y sistemas de acondicionamiento de potencia a nivel distribución (Custom Power o D-FACTS) entre otros [18]-[22]; lo que ha permitido mejorar la eficiencia técnica y económica, la gestión de la potencia, la calidad y el suministro continuo de energía de las redes eléctricas. En este contexto, los convertidores de electrónica de potencia han sido ampliamente utilizados en aplicaciones domésticas, industriales y de tecnologías de la información, sin embargo, en las últimas dos décadas han destacado en aplicaciones de acondicionamiento, compensación y filtrado en sistemas de potencia. Gracias a los convertidores de electrónica de potencia, ha sido posible incorporar a las redes eléctricas la generación de energía por las fuentes renovables eólica y solar, las cuales, hoy en día representan una pequeña parte de la generación total de energía, pero en un futuro serán la base fundamental del suministro energético [23].

Entre el continuo crecimiento de las energías renovables y la alta presión tecnológica impuesta por la infraestructura emergente de la red inteligente, existe una necesidad urgente de mejorar la flexibilidad del sistema de energía, de modo que se pueda perfeccionar la confiabilidad y estabilidad de la red, así como la calidad del suministro eléctrico [24].

El concepto de flexibilidad permite incorporar nuevas tecnologías a la red eléctrica de manera que no se modifiquen sus parámetros y características. Es decir, que su topología se

vuelve dinámica y puede cambiar continuamente sin interrumpir su funcionamiento y conservando su estabilidad. La flexibilidad en la red permitirá que productores de energía independientes, ya sea a mediana o pequeña escala, puedan acoplarse más fácilmente a la red, ayudando a migrar de una red centralizada a una descentralizada [25].

El estudio y análisis de los tipos de convertidores de electrónica de potencia, junto con sus estrategias de control y modulación, son una herramienta indispensable para el desarrollo de los sistemas de almacenamiento de energía por baterías, como se realiza en esta tesis de ingeniería.

2.1 Tipos de sistemas de almacenamiento de energía

La mayoría de los SAE aún poseen algunos retos técnicos a resolver como son la reducción de costos, el incremento de eficiencia y capacidad de carga. Sin embargo, con el devenir de los años estas tecnologías empezarán a mejorar sus características de costo/beneficio [26]. Dentro de los principales métodos para conservar la energía almacenada se encuentran: el almacenamiento mecánico, el almacenamiento térmico, el almacenamiento electroquímico y el almacenamiento eléctrico, los cuales se describen brevemente a continuación.

2.1.1 Baterías

Este tipo de tecnologías se usan para almacenamiento a pequeña escala. Los tipos de baterías que se utilizan son de Níquel-Cadmio (Ni-Cd), Plomo-ácido (Pb-ácido), Sodio-Azufre (Na-S) y la más utilizada de Iones de Litio (Li-ion). En la **Fig. 1-1** se observa una batería electrolítica y su estructura interna. El estado actual de esta tecnología requiere aún de investigación y mejoramiento de modo que sus costos se minimicen y puedan balancear la potencia variable generada por las fuentes renovables. Quizá las desventajas más importantes de las baterías sean su corta vida útil y el impacto ecológico que pueden generar si no se les da un adecuado tratamiento después de su uso [27].

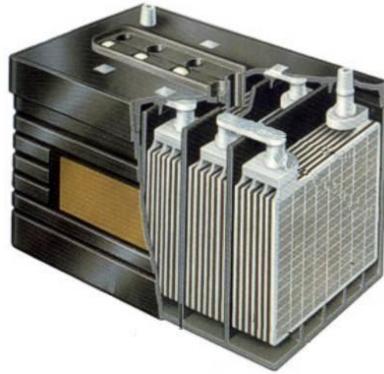


Fig. 2-1 Bateria electrolítica.

2.1.2 Supercapacitores

Este tipo de capacitores, como los que se observan en la **Fig. 2-2**, están contruidos, generalmente, a base de carbón activado y ofrecen una capacitancia y una densidad de energía mayor que la de los capacitores convencionales. Esta densidad de energía es menor que la que ofrecen las baterías, pero pueden suministrar una densidad de potencia mayor. Otra ventaja en favor de los supercapacitores es que se pueden cargar y descargar con magnitudes de corrientes mucho mayores sin afectar su vida útil, por lo que pueden ofrecer una mayor cantidad de ciclos de carga y descarga. El principal problema de los supercapacitores es que su energía almacenada es proporcional a la tensión al cuadrado, lo que significa que la tensión disminuye a medida que se extrae energía y para poder mantener el flujo de potencia constante se debe aumentar la corriente. Esto significa que la energía extraíble y la potencia del sistema de almacenamiento de energía se ven comprometidas, a menos que se pueda aumentar la calidad actual de las interfaces electrónicas de potencia (CD-CD o CD-CA), lo que aumenta su costo [28].



Fig. 2-2 Supercapacitor para auto eléctrico.

2.1.3 Volantes de inercia

Este dispositivo de almacenamiento, también llamado batería mecánica o *fly-wheel*, es un elemento capaz de almacenar energía en forma cinética mediante rotación. El volante de inercia, como el que se muestra en la **Fig. 2-3**, se carga y descarga por acción de una máquina eléctrica que funge como motor o generador, según sea el caso. Los volantes de inercia, a diferencia de las baterías y super capacitores, son tecnologías sostenibles que no perjudican al ambiente ya que no utilizan materiales tóxicos o dañinos en su construcción. Son adecuados para aplicaciones de alta potencia, pero la desventaja es que tienen una baja densidad de energía. A pesar de los altos costos iniciales, los volantes ofrecen una alternativa de almacenamiento de energía fiable y rentable a largo plazo [28].



Fig. 2-3 *Volante de inercia.*

2.1.4 Bombeo Hidráulico

El almacenamiento con bombeo hidráulico no es una tecnología emergente, pero ha servido como uno de los principales sistemas de almacenamiento de energía hasta ahora y probablemente en los años siguientes siga siendo parte importante del almacenamiento mientras las tecnologías emergentes mejoran sus capacidades. Este sistema utiliza dos embalses de agua separados a diferentes alturas, donde la energía se almacena en el agua en forma de energía potencial, como se observa en la **Fig. 2-4**. Durante las horas de baja demanda energética, el agua se bombea desde el depósito inferior al depósito superior. Durante las horas pico donde se requiere más potencia, el flujo de agua se invierte para generar electricidad. El bombeo hidráulico está disponible en casi cualquier escala con tiempos de descarga que van desde varias horas hasta algunos días. Su eficiencia está en el

rango de 70 a 85%. El principal inconveniente es que los sitios son limitados, ya que el almacenamiento con bombeo hidráulico requiere grandes embalses en áreas montañosas, que pueden estar lejos de la demanda [29].

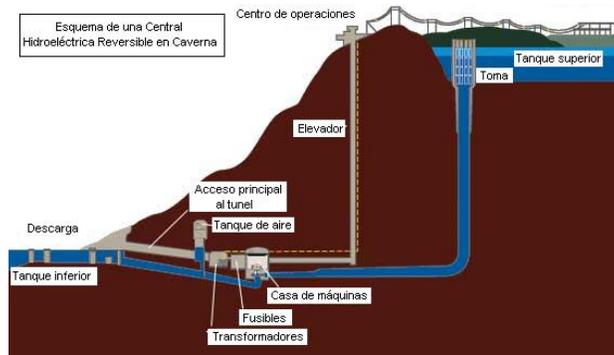


Fig. 2-4 Esquema de una central de bombeo hidráulico.

2.1.5 Aire comprimido

El almacenamiento de energía mediante aire comprimido, también conocido como CAES (Compressed Air Energy Storage), consiste en almacenar aire a altas presiones de 60-70 bar en depósitos bajo tierra, como se muestra en el diagrama de la **Fig. 2-5**. Dicho aire se presurizará de forma progresiva con enfriamientos intermedios en el proceso para lograr un mayor rendimiento de energía en periodos donde se posea energía excedente. Generalmente el aire se almacena en zonas mineras en desuso, pozos petrolíferos o de gas natural o acuíferos, lo cual permite un almacenamiento masivo de aire y sin los enormes costes que supondrían la realización del cubículo subterráneo. Podríamos decir que su funcionamiento es similar al de las plantas de bombeo reversibles, pero con aire, comprimiendo el fluido dentro de los almacenes durante las horas de baja demanda y cuando se necesita electricidad durante las horas pico, el aire comprimido se utiliza para generar electricidad a través de las turbinas de gas convencionales [28][29].

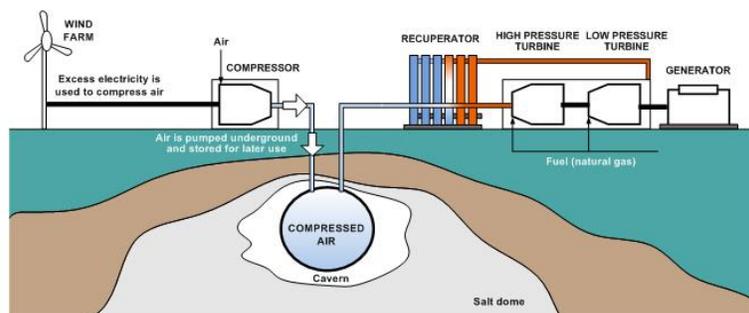


Fig. 2-5 Esquema de almacenamiento por aire comprimido.

2.2 Comparación de los sistemas de almacenamiento de energía

Una revisión analítica tomada de [30], muestra de forma resumida las diferencias cualitativas entre diversos tipos de sistemas de almacenamiento, mostrado en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1 Características técnicas de los SAE.

Tecnología	Capacidad	Densidad de energía	Eficiencia por ciclo	Vida útil	Tiempo de respuesta	Coste de energía	Duración del almacenamiento
Bombeo hidroeléctrico	Muy alta	Muy baja	Alta	Muy alta	Alto	Bajo	Alto
Aire comprimido	Alta	Muy baja	Baja	Alta	Medio	Bajo	Alto
Volante de inercia	Baja	Media	Muy alta	Media	Bajo	Muy alto	Bajo
Supercondensador	Muy baja	Baja	Alta	Alta	Muy bajo	Alto	Bajo
Pila de hidrógeno	Media	Muy alta	Media	Media	Bajo	Muy bajo	Alto
Almacenamiento térmico	ND	Alta	Alta	Alta	Muy alto	Muy bajo	Medio
Batería Pb-ácido	Media	Media	Alta	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio
Batería Ion-Li	Baja	Alta	Media	Media	Muy bajo	Alto	Medio
Batería Na-s	Alta	Alta	Media	Media	ND	Medio	Alto
Batería NiCd	Baja	Alta	Media	Media	Muy bajo	Alto	Medio

Como se ha presentado, existen distintas formas de almacenar energía, aunque los sistemas de baterías actualmente tienden a ser los más utilizados para el almacenamiento energético de baja escala debido a su alta eficiencia en comparación con los otros métodos. La ventaja de los BESS es que pueden proporcionar una respuesta más rápida para absorber potencia excesiva o compensar la potencia insuficiente durante la generación excedente y los períodos de carga pico, respectivamente, además del hecho de que pueden ser instalados en lugares óptimos cerca del consumo, reduciendo así gastos de infraestructura para su interconexión.

Para continuar con el análisis, es necesario evaluar las características de los convertidores de electrónica de potencia compatibles con la batería seleccionada, lo cual se realiza en el siguiente capítulo.

2.3 Electrónica de potencia aplicada a los sistemas BESS

El proceso de almacenamiento de energía requiere de varias etapas que adecúen y acondicionen el tipo de energía que hay en la red con el que se tiene en el banco o arreglo de baterías, para que esta pueda ser extraída o almacenada. Los BESS almacenan energía eléctrica en las baterías en forma de potencial electroquímico dentro de celdas, las cuales se cargan y descargan mediante la inyección y extracción de potencia eléctrica.

Los convertidores de electrónica de potencia presentan las características necesarias para poder acoplar los sistemas de CD con los de CA y viceversa, ya que permiten el flujo bidireccional de potencia y el acondicionamiento de voltajes y frecuencia. Un BESS está compuesto esencialmente por un inversor y un rectificador de corriente que permiten el flujo bidireccional de la potencia. Estos sistemas utilizan generalmente el convertidor VSC, descrito en el Capítulo 3, para realizar estas funciones [31].

2.4 Análisis de topologías en el estado del arte

Entre los factores decisivos para la selección de la topología de cualquier sistema de almacenamiento de energía, deben considerarse inicialmente los parámetros eléctricos de voltaje y corriente del BESS, la relación de voltajes de CA y CD y la capacidad A/hr de las baterías teniendo en cuenta siempre una velocidad de respuesta aceptable para la aplicación final [32].

Un análisis de las posibles configuraciones de topologías de BESS es presentado en esta sección, a fin de exponer las principales diferencias, ventajas y desventajas de cada topología en el estado del arte. En este sentido, el convertidor más frecuentemente implementado es el VSC (modelado en el Capítulo 3), en donde las terminales de CA de dicho convertidor pueden conectarse directamente a la red eléctrica a través de un acoplamiento inductivo o a través de un transformador según los niveles de voltaje requeridos. Por otra parte, el banco o bancos de baterías se integran directamente al puerto de CD de un VSC o a través de una etapa de conversión CD/CD.

En ambos casos, se requieren varias baterías conectadas en serie y paralelo para mantener de manera eficiente el voltaje y la corriente necesaria en el bus de CD.

Por una parte, las grandes configuraciones en serie son susceptibles a problemas de confiabilidad, ya que el deterioro individual de una sola batería debido a sobrecalentamiento o a sobrecarga/descarga, puede resultar en la pérdida de una gran parte de la capacidad del BESS. Para aumentar la confiabilidad de un BESS es preferible usar cadenas de baterías en serie más cortas y aumentar los módulos conectados en paralelo.

2.4.1 Sistema de baterías con Convertidor VSC.

La forma más sencilla de implementar un sistema de almacenamiento de energía trifásico consiste en la conexión directa del banco de baterías a las terminales de CD de un VSC. En esta topología el nivel de voltaje del puerto de CD debe de mantenerse constante manteniendo una relación de $V_{CD} > V_{LLpico}$. Por lo tanto, en esta configuración el voltaje V_{CD} comúnmente debe ser alcanzado a través de la conexión en serie de varias de baterías, para lo cual es necesario considerar que la relación de tensiones entre V_{bat} y V_{CD} es igual a uno [33]. El diagrama del sistema se observa en la **Fig. 2-6**.

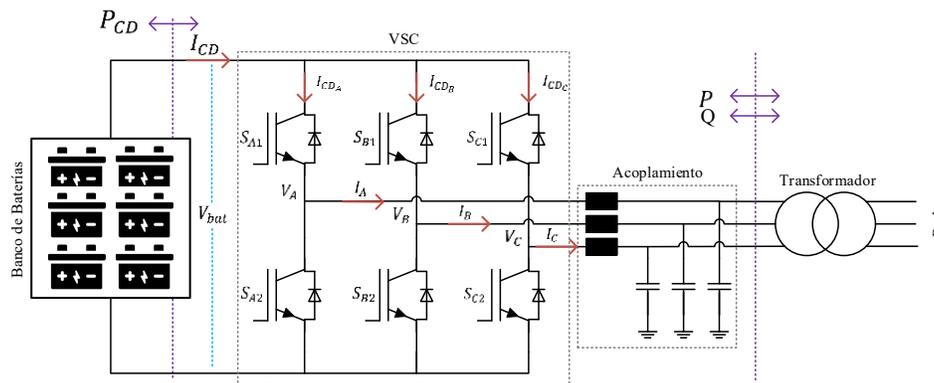


Fig. 2-6 Sistema de baterías con Convertidor VSC.

Como se ha mencionado anteriormente, la larga conexión en serie reduce la confiabilidad de un sistema de almacenamiento debido a fallas individuales, por lo tanto, este sistema ofrece poca flexibilidad de entre las tensiones de las baterías y el puerto de CD.

2.4.2 Sistema de baterías con Convertidor Buck-Boost y VSC.

A fin de aumentar la confiabilidad del sistema ante la falla de un arreglo serie y mejorar la flexibilidad de interconexión entre los voltajes de operación de la red y el banco de baterías, es conveniente agregar una nueva etapa de condicionamiento de energía CD/CD,

como se observa en la **Fig. 2-7**, donde se espera que la tensión de baterías sea menor al voltaje de CD en las terminales del VSC. La opción inmediata para esta condición consiste en conectar un convertidor elevador y reductor (Boost-Buck) entre el banco de baterías y el puerto de CD del VSC, como se muestra en la **Fig. 2-7**.

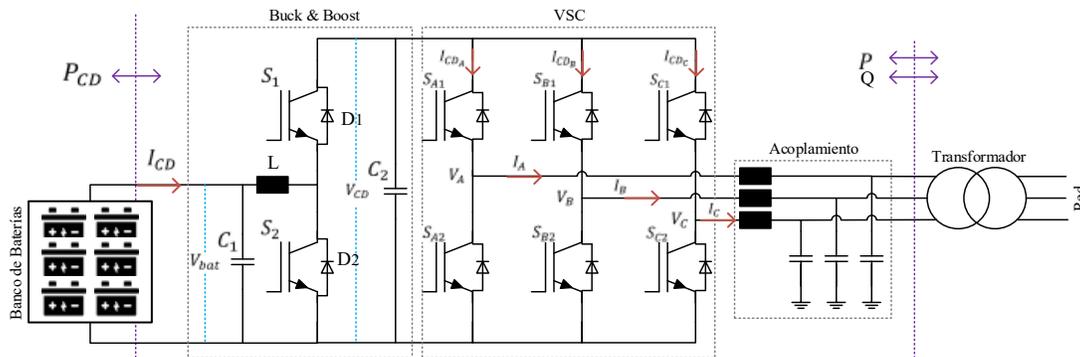


Fig. 2-7 Sistema de baterías con Convertidor Buck-Boost y VSC.

En esta topología, el convertidor Boost formado por los elementos L , S_2 , D_2 y D_1 opera cuando el flujo de potencia va del banco de baterías hacia el VSC, mientras que el interruptor S_1 se mantiene inhabilitado. Por otra parte, el convertidor Buck formado por los elementos S_1 , D_1 , D_2 , L y C , opera cuando el flujo de potencia va del VSC hacia el banco de baterías, mientras el interruptor S_2 se mantiene inhabilitado [34].

En este contexto, el VSC opera en modo control de voltaje en C_2 mientras que el conjunto de convertidores CD/CD opera en modo control de potencia, para lo cual es necesario considerar que la relación de tensiones entre V_{bat} y V_{CD} no sea mayor a 4 veces además de que las funciones de elevación y reducción de voltaje no son lineales.

2.4.3 Sistema de baterías con Convertidor Buck-Boost Triple y VSC

Bajo el mismo principio de operación de la topología descrita anteriormente, la implementación del convertidor Buck-Boost Triple en paralelo como se muestra en la **Fig. 2-8** tiene la capacidad de reducir los rizados de corriente y voltaje en V_{CD} y/o reducir el tamaño de los componentes de filtrado L y C en los puertos de CD.

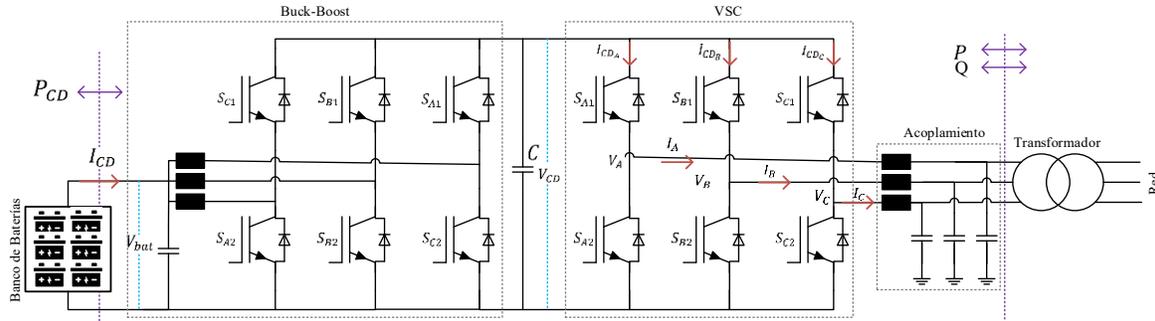


Fig. 2-8 Sistema de baterías con Convertidor Buck-Boost Triple y VSC.

La generación de corrientes y voltajes más suaves o sin discontinuidades reduce el estrés en los dispositivos semiconductores y baterías logrando así alargar su vida útil, mientras que la reducción del tamaño de los componentes de filtrado aumenta la densidad de potencia del dispositivo. Dicho lo anterior esta topología adquiere algunas ventajas significativas en el proceso de conversión, pero el aumento de interruptores puede incrementar su costo mientras que la relación de voltajes en V_{bat} y V_{CD} continúa siendo 1:4 máximo [35].

2.4.4 Sistema de baterías con Convertidor Celdas en Cascada

A fin de adaptar los convertidores de electrónica de potencia a mayores niveles de tensión de CA, algunas aplicaciones hacen uso de submódulos de conversión H conectados en serie, donde al mismo tiempo es posible interconectar sub-bancos de baterías combinando ventajas de conversión y almacenamiento en un solo dispositivo. Una de las estrategias es usar el convertidor celdas en cascada con bancos de baterías en el lado de CD, como se muestra en la **Fig. 2-9**.

Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de sistema logra expandir la capacidad de voltaje, pero al mismo tiempo se observa que la operación de las baterías en carga y descarga no es uniforme, lo cual puede conllevar a reducir la vida útil de las baterías de forma no uniforme. Por otra parte, si alguno de los bancos de batería falla, el sistema de conversión no puede reconstruir totalmente la forma de onda de CA de salida [36].

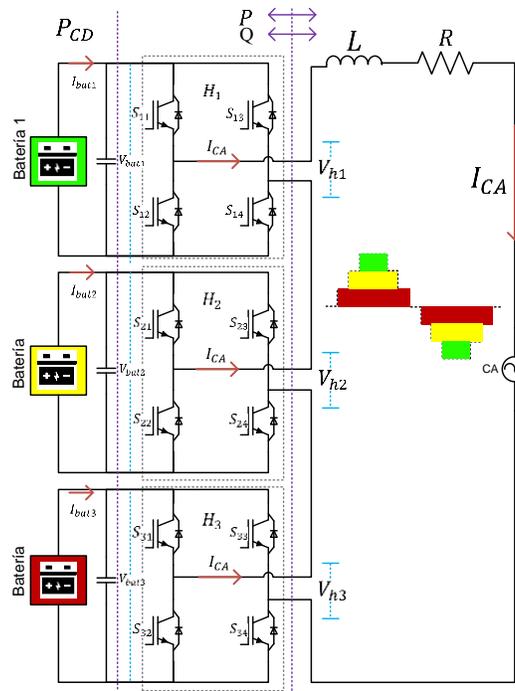


Fig. 2-9 Sistema de baterías con Convertidor Celdas en Cascada.

2.4.5 Sistema de baterías con Convertidor Modular Multinivel

Otra opción de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala, consiste en aplicar la topología Modular Multinivel, la cual consiste en la conexión en serie de celdas de medio puente idénticas con sub-bancos de baterías en los puertos de CD como se observa en la **Fig. 2-10**.

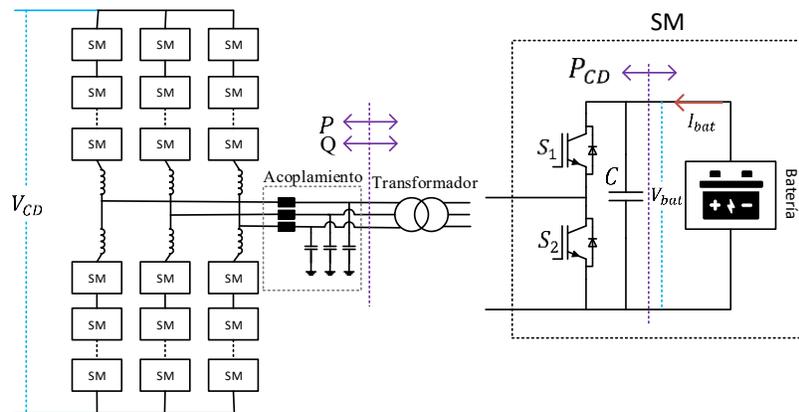


Fig. 2-10 Sistema de baterías con Convertidor Modular Multinivel.

Este tipo de topología adquiere ventajas significativas para la gestión de potencia activa y reactiva en redes de transmisión, donde debido a las escalas de tensión que se manejan, es necesario, la interconexión de un gran número de celdas en serie. Esta característica puede traer ventajas ante la pérdida de un submódulo de baterías, haciendo una redistribución energética en los bancos adyacentes, pero cabe resaltar que las propuestas publicadas sobre este tipo de convertidor están relacionada a redes de alto voltaje como sistemas HVDC, por lo tanto, su aplicación en redes de distribución resultaría sobredimensionada [37].

2.4.6 Sistema de baterías con Convertidor DAB y VSC

A diferencia de las topologías con aislamiento galvánico entre el convertidor y las baterías, las topologías no aisladas, mencionadas anteriormente, utilizan circuitos adicionales para proteger el banco de baterías de cualquier transitorio proveniente de la red, donde esto se puede implementar mediante fusibles. Para superar los inconvenientes de los controladores de carga no aislados, se puede usar un convertidor con un transformador que proporcione un aislamiento galvánico intrínseco entre las baterías y las otras etapas. Además, al establecer una relación de tensión a través del mismo transformador, es posible aumentar la flexibilidad y compatibilidad de interconexión entre los puertos de CD, V_{bat} y V_{CD} , lo cual indudablemente hace posible utilizar baterías de bajo voltaje con mayores etapas en paralelo.

Otra opción de convertidor aplicado al sistema de almacenamiento de energía, consiste en agregar una conversión CD/CD que incluya una etapa de aislamiento galvánico, como lo es el convertidor DAB en conjunto con el convertidor VSC, mostrado en la **Fig. 2-11**.

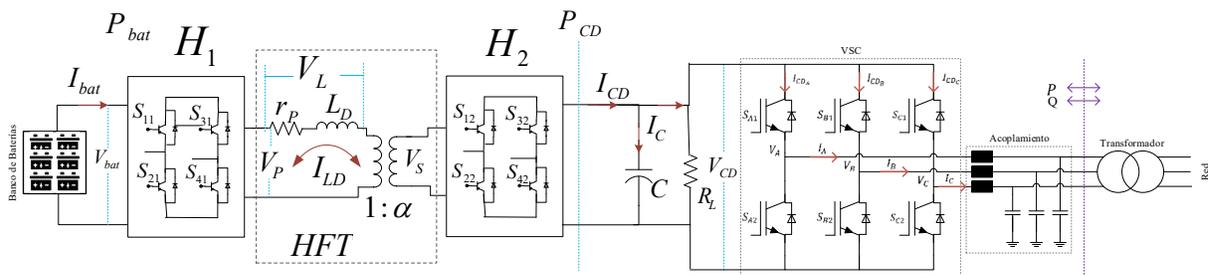


Fig. 2-11 Sistema de baterías con Convertidor DAB y VSC.

Debido a la mayor cantidad de piezas (semiconductores y componentes magnéticos), se espera que la solución aislada sea más costosa y menos eficiente que el controlador de carga no aislado. Sin embargo, al utilizar las últimas tecnologías IGBT en asociación con las técnicas de modulación, es posible reducir las pérdidas de semiconductores y obtener así niveles de eficiencia superiores al 95%, además de una gran flexibilidad de conversión entre los niveles de tensión de la batería y la tensión en el puerto de CD del VSC.

2.4.7 Resumen de características

Como se observa en las características de la **Tabla 2-2**, referentes a una comparación entre las topologías de electrónica de potencia empleadas en el almacenamiento de energía, el convertidor VSC más el DAB, logran cumplir con ventajas relevantes en redes a nivel distribución, dicho lo anterior, esta topología será el foco de estudio dentro de esta tesis de ingeniería.

Tabla 2-2 Resumen de características de las topologías del BESS.

Tipo de convertidor	Aplicación			Características Operación		
	Industrial	Distribución	Transmisión	Flexibilidad	Linealidad	Confiabilidad
VSC	✓	✓			✓	
Convertidor Buck & Boost + VSC	✓	✓		✓		✓
Convertidor Buck & Boost Multifase + VSC	✓	✓		✓		✓
Convertidor Celdas en cascada		✓	✓		✓	
Convertidor Modular Multinivel			✓		✓	✓✓
Convertidores DAB + VSC	✓	✓		✓✓	✓	✓

CAPÍTULO 3

MODELADO DE UN BESS

En esta sección se describen los fundamentos para el análisis y control de un BESS, cuya particularidad es el convertidor CD/CD (DAB), el cual proporciona un alto rango de flexibilidad útil en la operación de los BESS. Exponiendo las técnicas efectivas para el modelado matemático de un convertidor DAB, un convertidor VSC y un modelo de batería, ayudando a entender los procedimientos y los pasos para el análisis del BESS. Se incluyen simulaciones detalladas para resaltar los puntos destacados y corroborar el diseño.

3.1 Modelo de la batería

El modelo general de una batería se muestra en la **Fig. 3-1**.

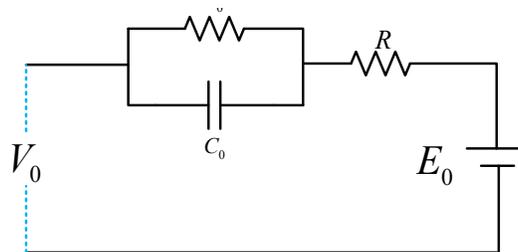


Fig. 3-1 Modelo equivalente de una batería.

Donde:

- R es la resistencia interna de la batería
- E_0 voltaje de circuito abierto
- C_0 capacidad de la batería
- R_0 resistencia no lineal

Los sistemas de almacenamiento de energía con baterías están formados por arreglos de baterías serie-paralelo, que generalmente no se utilizan para altas tensiones debido a que requerirían de muchas baterías en serie, reduciendo la confiabilidad del sistema, como se explicó en el Capítulo 2. La tecnología de las baterías, en particular la de Li-Ion ha tenido un

incremento notorio en su desarrollo durante los últimos años; en gran medida se debe a la demanda de las redes eléctricas inteligentes y las aplicaciones para vehículos eléctricos.

A partir del 2014 la batería de NaS es sustituida por la de Ion-Li y la de redox, debido a sus mejores rendimientos. La capacidad instalada de la batería de ion-Li crece rápidamente, por lo que se espera que se convierta en la tecnología de almacenamiento dominante para el futuro. La batería de Li-Ion es un tipo de batería recargable cuyo funcionamiento se basa en el intercambio de iones de litio entre el cátodo y el ánodo.

Tabla 3-1 Atributos principales de las baterías más representativas.

Tipo	Plomo-ácido	NiMH	Li-Ion	NaS
Densidad de energía [Wh/kg]	25-50	60-120	75-200	150-240
Densidad de potencia [W/kg]	75-300	250-1000	500-2000	150-230
Ciclo de vida	200-1000	180-2000	1000-10000	2500-4000
Costo capital [US\$/kWh]	100-300	900-3500	300-2500	300-500
Eficiencia por ciclo	75-85	65	85-97	75-90
Autodescarga	Baja	Alta	Media	-

En comparación con otros tipos de baterías (por ejemplo, NiMH, NiCd, y Plomo-ácido), las baterías de Li-Ion tienen las ventajas de alta densidad de energía (debido a la alta tensión de salida), alta eficiencia, largo ciclo de vida y son amigables con el ambiente como se puede observar en la **Tabla 3-1**. Estos atributos hacen que las baterías de iones de litio sean las más utilizadas para los aparatos electrónicos portátiles. El ciclo de vida de la batería es un factor clave para la aplicación en la red, así como para la viabilidad económica del sistema de almacenamiento [38]. El modelo utilizado para representar el comportamiento de la batería de Li-Ion corresponde al modelo de batería de Simulink, descrito por las ecuaciones siguientes:

Modelo de descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3.1)$$

Modelo de carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3.2)$$

Donde:

- E_0 es un voltaje constante, en V.
- K es una constante de polarización, en Ah-1.
- i^* es la dinámica de la corriente de baja frecuencia, en A.
- i es la corriente de la batería, en A.
- Q es la capacidad máxima de la batería, en Ah.
- A es un voltaje exponencial, en V.
- B es una capacidad exponencial, en Ah-1.
- it es la capacidad de extracción, en Ah.

El modelo de batería descrito por (3.1) y (3.2) es implementado en el sistema BESS propuesto en este trabajo de tesis, no con el propósito de probar la capacidad y desempeño de carga y descarga de energía, sino para poder analizar el comportamiento del sistema BESS con un convertidor DAB dentro de su topología, así como su impacto en una microrred, por lo que tampoco son considerados los efectos de envejecimiento y de temperatura en la batería. Sin embargo, es relevante el tipo de batería integrada al sistema ya que la batería de Li-Ion posee la mayor densidad de potencia, permitiendo tener una mayor capacidad de flujo de potencia con un menor número de baterías.

3.2 Modelo del doble puente activo (DAB)

En esta sección se muestra el modelado y simulación a detalle del convertidor CD/CD operando de forma bidireccional como un controlador de potencia activa dentro del sistema BESS. Como se ha mostrado en la **Fig. 3-2**, en el primer puerto de CD se considera la confección de un banco de baterías, mientras que el segundo puerto de CD, se considera una tensión constante regulada por el convertidor VDC.

3.2.1 Principio de operación del DAB

El DAB posee, por lo general, una topología de doble puerto, y cada puerto consiste en un puente-H completo, enlazados a través de un transformador de alta frecuencia como se muestra en la **Fig. 3-2**. Los puentes-H cuentan con dos parámetros que caracterizan su

funcionamiento y a través de los cuales se implementa el control. Estos son el desplazamiento de fase (ϕ_D) y el ancho de pulso (μ).

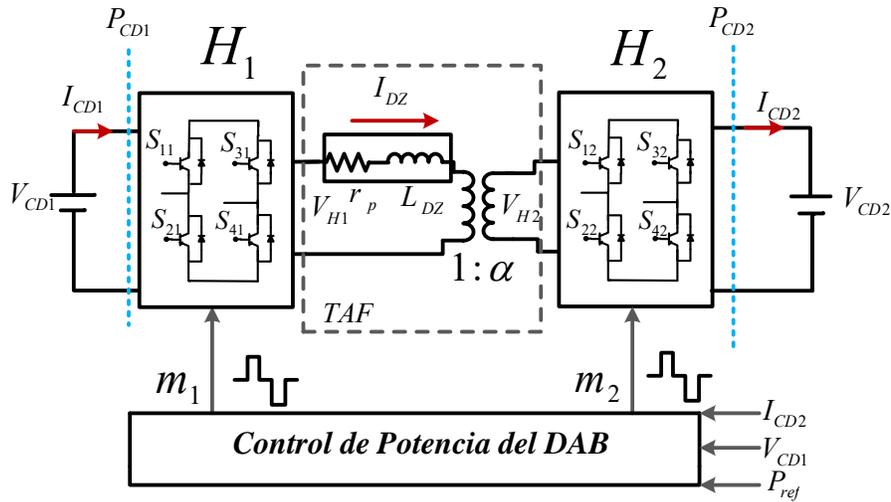


Fig. 3-2 Topología del convertidor DAB.

La diferencia de potencial que existe entre los devanados del transformador de alta frecuencia ($V_{H1}-V_{H2}$), genera una corriente I_{DZ} que fluye a través de la inductancia de dispersión (L_{DZ}) del transformador. El sentido del flujo de la corriente, dependerá de la relación de desplazamiento de fase entre las señales moduladoras m_1 y m_2 de cada puente-H. El desplazamiento de fase ϕ_D se controla solamente en el segundo puente-H (H_2), mientras que en el primero se mantiene fijo. En cambio, el ancho de pulso μ se puede controlar en ambos convertidores por D_μ , (donde $D_\mu = \frac{1}{2} - \mu$). De esta forma, la tensión en los devanados del transformador (V_{H1} y V_{H2}) podrá ser de dos niveles cuando $D_\mu = 0$, generando señales cuadradas de voltaje con un 50% de ciclo de trabajo o de tres niveles cuando $0 \leq D_\mu \leq 1$ [39].

La dirección del flujo del convertidor depende solo del cambio de fase en el rango de $0 \leq \phi_D \leq \frac{\pi}{2}$, teniendo en $\frac{\pi}{2}$ la máxima transferencia de potencia y en cero la mínima. La Fig. 3-3 muestra la modulación del proceso para V_{H1} y V_{H2} , generada por los puentes-H.

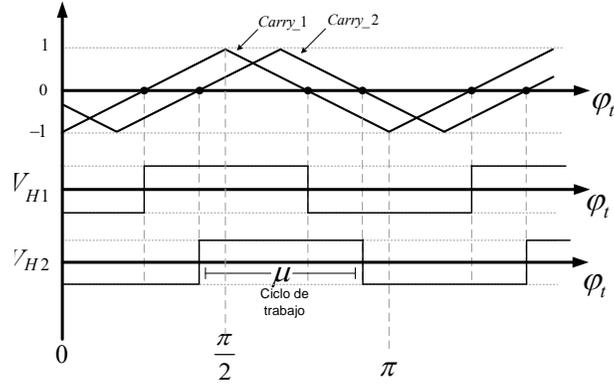


Fig. 3-3 Proceso de Modulación del DAB

Los modelos matemáticos de las variables principales del convertidor DAB se analizan en la siguiente sección.

3.2.2 Funciones de conmutación

Considerando un esquema PWM de dos niveles de voltaje para el módulo puente-H, las funciones de conmutación $S_{1,j}$ y $S_{2,j}$, (donde $j \in \{1,2\}$) para cada convertidor de puente-H se definen por sus pulsos lógicos [40], como se muestra en la **Tabla 3-2**.

Tabla 3-2 Funciones de conmutación para el control del puente-H.

$S_{1,j} - S_{3,j}$	V_{Hj}	I_{CDi}
1	V_{CDi}	I_{DZ}
-1	$-V_{CDi}$	$-I_{DZ}$

De la **Tabla 3-2**, las relaciones de V_{H1} y V_{H2} son:

$$V_{H1} = (S_{11} - S_{31})V_{CD1} \approx m_1 * V_{CD1} \quad (3.3)$$

$$V_{H2} = (S_{12} - S_{32})V_{CD2} \approx m_2 * V_{CD2} \quad (3.4)$$

El flujo de corriente I_{DZ} en el circuito formado por la malla V_{H1} , V_{H2} y la inductancia L_{DZ} en la **Fig. 3-2** está dado por:

$$I_{DZ} = \frac{1}{L_{DZ}} \int_0^{\phi_D} V_{DZ} * d\phi_D + I_{DZ}^o \quad (3.5)$$

Donde I_{DZ}^0 es la condición inicial de I_{DZ} y V_{DZ} se define como:

$$V_{DZ} = V_{H1} - \alpha * V_{H2} \quad (3.6)$$

La corriente en las terminales de CD del Puente-H se puede definir como:

$$I_{CD1} = m_1 * I_{DZ} \quad (3.7)$$

$$I_{CD2} = m_2 * \frac{I_{DZ}}{\alpha} \quad (3.8)$$

Para mantener la relación de potencia entrada/salida, se tiene:

$$|V_{CD1} * I_{CD1}| = |V_{CD2} * I_{CD2}| \quad (3.9)$$

De esta forma, para un convertidor sin pérdidas con $r_p=0$, en donde r_p representa la resistencia de los convertidores, se obtiene un circuito basado en fuentes dependientes usando la inductancia de parásita del transformador y los valores equivalentes de los voltajes en las terminales como se muestra en la **Fig. 3-4** [41].

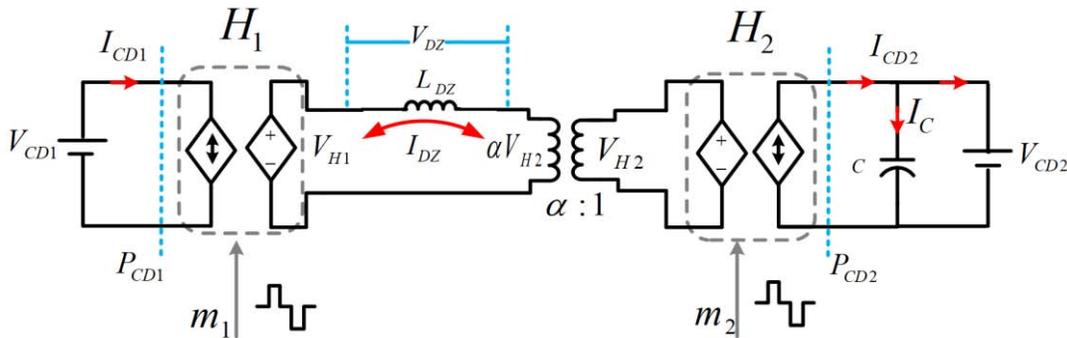


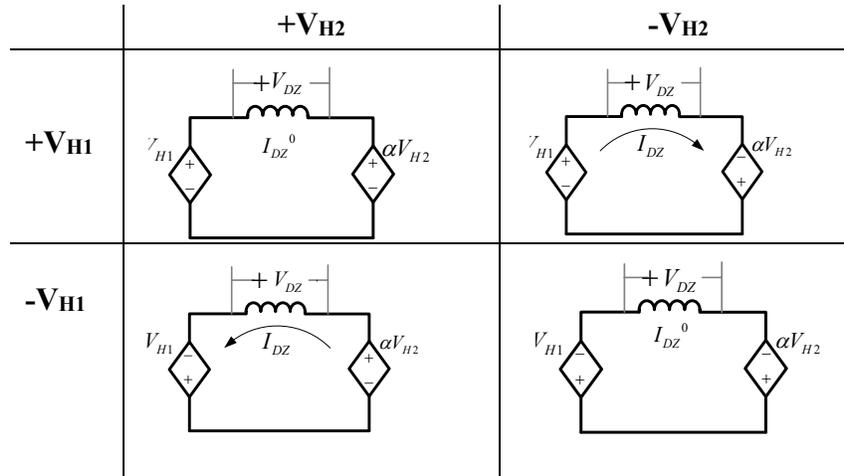
Fig. 3-4 Circuito equivalente del convertido DAB.

Con base en el circuito intermedio formado por las fuentes V_{H1} , V_{H2} y la inductancia L_{DZ} , es posible analizar la forma de onda de la corriente (I_{DZ}) en el transformador de alta frecuencia dependiente de las fuentes de CD V_{CD1} y V_{CD2} . Los diferentes estados topológicos del convertidor DAB se muestran en la **Tabla 3-3**.

Derivado de los estados topológicos expuestos en la **Tabla 3-3**, es posible obtener una matriz cuadrada de 2x2 que muestre los estados de los diferentes niveles de voltaje de V_{DZ} en base a V_{CD1} y V_{CD2} , como se indica en (3.10).

$$V_{DZ} = \begin{bmatrix} V_{CD1} + \alpha * V_{CD2} & +V_{CD1} - \alpha * V_{CD2} \\ -V_{CD1} + \alpha * V_{CD2} & -V_{CD1} - \alpha * V_{CD2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Tabla 3-3 Estados topológicos para la modulación SPSC.



Para un sistema en donde los niveles de voltaje de CD del convertidor DAB son constantes y el coeficiente de relación de transformación (α) es igual a la relación entre los voltajes de V_{CD1} y V_{CD2} (es decir $V_{CD1} = \alpha * V_{CD2}$), es posible obtener un nivel voltaje de CD que represente a ambos (V_{CD12}), cumpliendo que:

$$\frac{V_{CD1}}{V_{CD2}} = \frac{Np}{Ns} = \alpha \quad (3.11)$$

3.2.3 Modulación SPSC ($D_\mu = 0$ y $0 \leq \phi_D \leq \frac{\pi}{2}$)

En el esquema de modulación SPSC se operan los dos puentes-H con un ciclo de trabajo de $\mu=50\%$ para poder generar voltajes puramente rectangulares en V_{H1} y V_{H2} . La transferencia de potencia es controlada con el ángulo de fase ϕ_D entre V_{H1} and V_{H2} , de la misma forma que la operación convencional [42].

La **Fig. 3-5**, muestra el método de modulación SPSC, para el punto de operación $D_\mu=0$, exponiendo el voltaje aplicado a la impedancia (V_{DZ}), el cual alcanza valores pico a pico $4V_{DZ12}$, generando así una forma de onda trapezoidal de corriente I_{DZ} , que no presenta discontinuidad. También se observa la forma de onda de corriente en la fuente de potencia V_{CD1} , la cual está compuesta por una corriente positiva (I_A) que representa el intercambio de potencia activa entre V_{CD1} y V_{CD2} , y una corriente reactiva (I_Q) la cual siempre es inherente a la corriente activa en el modo de modulación SPSC, en este caso ambas corrientes dependen del desplazamiento de fase ϕ_D .

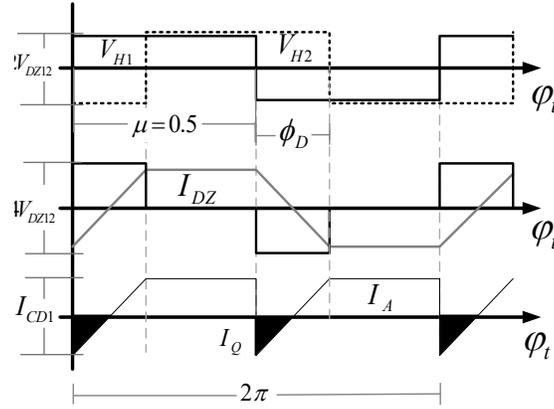


Fig. 3-5 Modulación SPCS ($D_\mu = 0$).

Con base en las formas de onda mostradas en la Fig. 3-5, es posible obtener el modelo matemático del DAB con modulación SPSC, obtenido de [43], como se muestra en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Modelos matemáticos para la modulación SPSC.

ϕ_D	D_μ	$I_A(\phi_D)$	$I_Q(\phi_D)$
$0 \leq \phi_D \leq \frac{\pi}{2}$	$D_\mu = 0$	$\frac{V_{DZ12}}{2\pi^2 F_C L_D} [\pi\phi_D - \phi_D^2]$	$-\frac{V_{DZ12}}{8\pi^2 F_C L_D} \phi_D^2$

3.2.4 Modelo de planta del DAB

Resolviendo la parte de CA del DAB con las ecuaciones (3.5) y (3.6), y aplicando la transformada de Laplace a I_{DZ} , es posible describir el modelo del convertidor como:

$$I_{DZ}(s) = \frac{V_{DZ}(s)}{sL_{DZ} + r_p} \quad (3.12)$$

De la misma forma, si se considera la ecuación (3.8), la corriente $I_{CD_2}(s)$ presente en el puerto de V_{CD_2} puede representarse en el dominio de la frecuencia como:

$$I_{CD_2}(s) = \frac{m_2(s) \cdot V_{DZ}(s)}{sL_{DZ} + r_p} \quad (3.13)$$

De esta forma, sabiendo que la excitación para la producción de $I_{CD_2}(s)$ es directamente proporcional a $m_2(s) \cdot V_{DZ}(s)$, es posible realizar una sustitución de variable como: $u(s) \approx m_2(s) \cdot V_{DZ}(s)$, donde ahora la ecuación (3.13), puede reescribirse como:

$$H(s) = \frac{I_{CD_2}(s)}{u(s)} \approx \frac{1}{s + \frac{r_p}{L_{DZ}}} \quad (3.14)$$

A fin de obtener un lazo de retroalimentación capaz de controlar la potencia activa bidireccional en el convertidor DAB, a partir de la corriente $I_{CD_2}(s)$, es necesario proponer un compensador $k(s)$ de la forma:

$$k(s) = \left[\frac{k_p}{s} \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right) \right] \quad (3.15)$$

El lazo de retroalimentación de corriente se implementa utilizando $I_{CD_2,ref}$ como referencia constante para controlar la salida de corriente en el puerto V_{CD_2} [44]. Este esquema mantiene la regulación de potencia de CD para un amplio rango de valores bidireccionales usando un solo PI. Bajo estas consideraciones, es posible expresar la variable $u(s)$ como la salida del compensador PI de la forma:

$$u = V_e \cdot k(s) \approx \left(I_{CD_2,ref} - I_{CD_2}(s) \right) \left[\frac{k_p}{s} \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right) \right] \quad (3.16)$$

Con base en (3.14) y (3.15), el esquema del control del convertidor DAB, desde la P_{CDref} hasta P_{DC} , es de la forma siguiente.

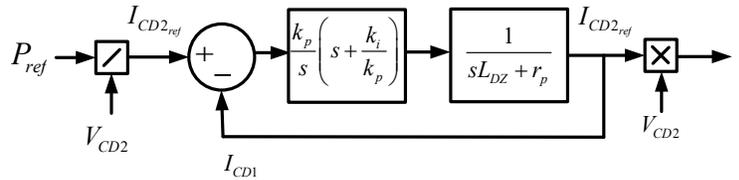


Fig. 3-6 Modelo de planta y compensador del DAB

Finalmente considerando los dos puertos de CD constantes, la función de transferencia de lazo cerrado del convertidor DAB puede expresarse de la forma:

$$\frac{I_{CD_2}(s)}{I_{CD_2,ref}} = \frac{k(s) \cdot H(s)}{k(s) \cdot H(s) + 1} = \frac{\left[\frac{k_p}{s} \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right) \right] \left[\frac{1}{\frac{L_{DZ}}{s} + \frac{r_p}{L_{DZ}}} \right]}{\left[\frac{k_p}{s} \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right) \right] \left[\frac{1}{\frac{L_{DZ}}{s} + \frac{r_p}{L_{DZ}}} \right] + 1} \quad (3.17)$$

En este contexto, si se considera una igualdad entre el cero del compensador $k(s)$ y el polo de la planta $I_{CD_2}(s)$, de la forma:

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{r_p/\tau_D}{L_{DZ}/\tau_D} \quad (3.18)$$

La ecuación (3.17) puede describirse como:

$$\frac{I_{CD_2}(s)}{I_{CD_2ref}} = \frac{\frac{k_p}{sL_h}}{\frac{k_p}{sL_h} + 1} \quad (3.19)$$

Rescribiendo la ecuación (3.19) y considerando la igualdad $\frac{L_h}{K_p} = \tau_D$, es posible obtener:

$$\frac{I_{DC_2}(s)}{I_{DC_2ref}} = \frac{k_p}{\frac{L_{DZ}}{K_p}s + 1} = \frac{1}{\tau_D \cdot s + 1} \quad (3.20)$$

Donde en (3.20), la variable τ_D representa un tiempo de respuesta designado en el control del convertidor, como paso subsecuente es necesario comprobar la operación del convertidor DAB operando como control de potencia de CD, lo cual se muestra en la sección siguiente.

3.2.5 Prueba de lazo cerrado

La **Tabla 3-5** muestra los valores implementados en el convertidor de DAB para la prueba de lazo cerrado.

Tabla 3-5 Parámetros para el diseño de convertidores DAB.

<i>Valores del DAB</i>	<i>F_c</i>	1kHz
	<i>L_D</i>	7.125 mH
	<i>r_p</i>	0.25 Ω
	<i>C</i>	10 mF
	<i>P_{ref}</i>	-100 – 100 kW
Valores del compensador	<i>k_p</i>	0.0001
	<i>k_i</i>	0.2
	<i>τ_D</i>	28.5 ms

Para esta prueba se implementó un control de potencia basado en los parámetros de voltaje y corriente en el convertidor usando un esquema PI, como el que se muestra en la **Fig. 3-7**.

Para la prueba de lazo cerrado, se hizo variar la potencia de referencia de forma escalonada de acuerdo como lo indica (3.21):

$$P_{ref} = \begin{cases} 0 & 0 < t < 0.1 \\ 100 & 0.1 < t < 0.35 \\ -100 & 0.35 < t < 0.6 \\ 0 & 0.6 < t \end{cases} kW \quad (3.21)$$

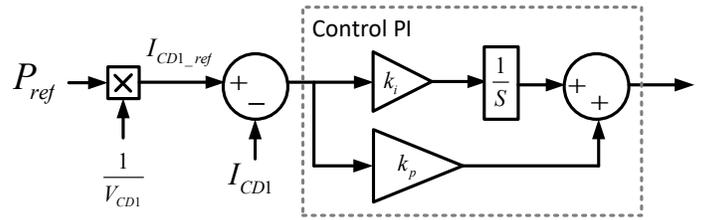


Fig. 3-7 Control de Lazo Cerrado.

En el conjunto de gráficas mostradas en la **Fig. 3-8**, se demuestra el comportamiento de las variables del DAB, descritas en este capítulo, con un escalamiento en la potencia de referencia y un esquema de lazo cerrado para un sistema de 100 kVA.

La gráfica a) de la **Fig. 3-8** muestra el comportamiento del flujo de potencia a través del DAB, el cual responde al escalonamiento de la potencia de referencia planteado en (3.21). La respuesta de la potencia posee un comportamiento críticamente amortiguado, ya que esta se trabaja como un sistema de primer orden, con un tiempo de respuesta de aproximadamente 0.05 s. En la gráfica b) de la **Fig. 3-8** se ilustra el comportamiento del control de potencia del DAB, es decir, el desplazamiento de fase del segundo puente H, que de igual forma obedece a la variación en el cambio de la potencia de referencia. El desplazamiento de fase varía únicamente entre $\frac{\pi}{2}$ y $-\frac{\pi}{2}$.

La gráfica c) de la **Fig. 3-8** muestra los estados de los voltajes (V_{H1} y V_{H2}) generados por los puentes H1 y H2, los cuales muestran que V_{H1} no genera cambio de fase o cambios en la magnitud, por otra parte, el voltaje V_{H2} , sufre un cambio de fase generado en la misma magnitud que la señal carry2, como se observa en la **Fig. 3-3**.

La forma de la corriente que circula a través de la inductancia parásita del transformador de alta frecuencia se muestra en la gráfica d) de la **Fig. 3-8**. Como se observó, esta posee la forma trapezoidal característica de la corriente del DAB. Esta corriente se genera por las variaciones en el desplazamiento de fase entre los voltajes V_{H1} y V_{H2} .

Finalmente, la corriente que fluye por la fuente V_{CD2} se muestra en la gráfica e) de la **Fig. 3-8**. Como se observó existe una componente reactiva en estado estable debida al esquema de modulación SPSC utilizado que no genera inconvenientes para el propósito de este trabajo de tesis.

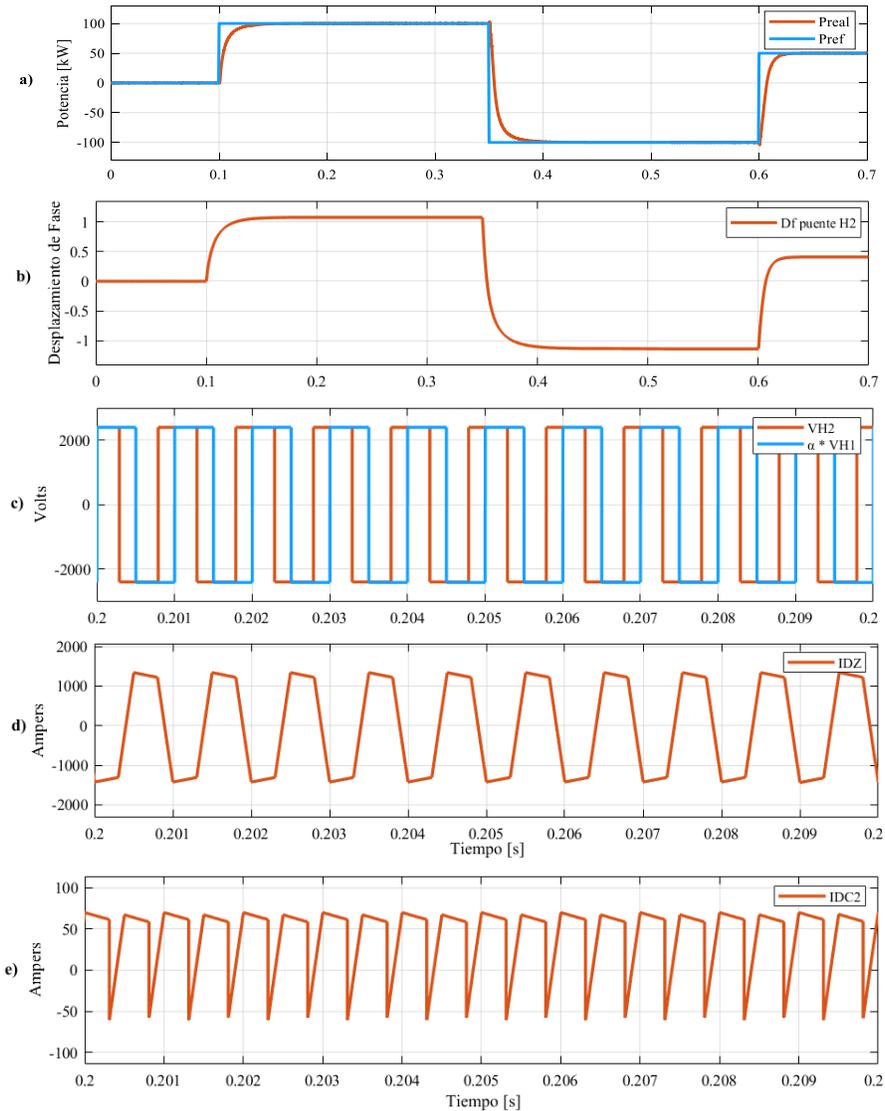


Fig. 3-8. Dinámicas de lazo cerrado para cambios de potencia escalonados.

En esta sección se ha demostrado de forma particular la operación del convertidor DAB operando como un sistema capaz de transferir potencia entre dos puertos de CD. Se ha demostrado el proceso de modelado de planta y compensador utilizando las herramientas clásicas de control en lazo cerrado. Como parte subsecuente es necesario demostrar de forma independiente la operación del convertidor VSC como se muestra en la sección siguiente.

3.3 Modelo del VSC de Seis Pulsos

3.3.1 Principio de operación del VSC

La topología usual de un VSC trifásico de dos niveles consiste básicamente de tres estructuras de medio puente-H idénticas, conocidas como puente trifásico. Esta topología puede tener dos niveles de voltaje, $-V_{CD}$ y V_{CD} , en sus salidas (t_i).

El lado de CA de cada Puente-H trifásico se conecta fase a fase con un sistema de CA de bajo voltaje, como se puede observar en la **Fig. 3-9**. El VSC de dos niveles permite el flujo bidireccional de potencia entre el puerto de potencia CD de bajo voltaje (V_{CD}) y las fuentes de CA (V_i), donde $i \in \{a, b, c\}$, para un sistema trifásico.

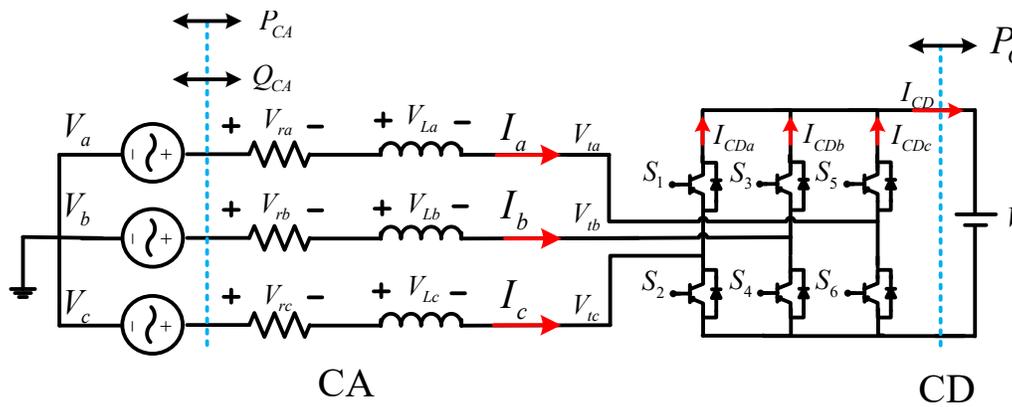


Fig. 3-9 Convertidor VSC Trifásico de Seis Pulsos, conectado a la red.

Si la frecuencia de conmutación de los dispositivos IGBT es, por lo menos diez veces mayor que la frecuencia fundamental del sistema de CA, entonces los eventos de conmutación se pueden representar por convertidores VSC de conmutación promediada (modelo promediado), resultando en una mejora significativa de la velocidad de simulación [45].

El voltaje de la red al cual está conectado el lado de CA del VSC, se define como:

$$V_a(t) = V * \sin(\omega t) \quad (3.22)$$

$$V_b(t) = V * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.23)$$

$$V_c(t) = V * \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.24)$$

Los voltajes en las resistencias se definen de la siguiente manera:

$$V_{ra}(t) = r_a * i_a(t) \quad (3.25)$$

$$V_{ra}(t) = r_a * i_a(t) \quad (3.26)$$

$$V_{ra}(t) = r_a * i_a(t) \quad (3.27)$$

Los voltajes en las inductancias se definen por:

$$V_{La}(t) = L \frac{d(i_a(t))}{dt} \quad (3.28)$$

$$V_{Lb}(t) = L \frac{d(i_b(t))}{dt} \quad (3.29)$$

$$V_{Lc}(t) = L \frac{d(i_c(t))}{dt} \quad (3.30)$$

Las variables de modulación para el control del cierre y apertura de los interruptores se pueden definir como:

$$m_a(t) = m * \sin(\omega t + \emptyset_m) \quad (3.31)$$

$$m_b(t) = m * \sin(\omega t + \emptyset_m - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.32)$$

$$m_c(t) = m * \sin(\omega t + \emptyset_m + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.33)$$

Los voltajes en las terminales de CA del convertidor VSC son:

$$V_{ta}(t) = \frac{1}{2} V_{CD} * m_a(t) \quad (3.34)$$

$$V_{tb}(t) = \frac{1}{2} V_{CD} * m_b(t) \quad (3.35)$$

$$V_{tc}(t) = \frac{1}{2} V_{CD} * m_c(t) \quad (3.36)$$

Con base en las señales de modulación m_a , m_b y m_c , los voltajes en la red (3.22), (3.23) y (3.24), y la impedancia $L-r$, se lleva a cabo un análisis de malla [46]. Considerando la caída de voltaje de cada elemento, las ecuaciones para el lado de CA del circuito de la **Fig. 3-9** son:

$$L \frac{d(i_a(t))}{dt} = V_a(t) - r_a * i_a(t) - V_{ta}(t) \quad (3.37)$$

$$L \frac{d(i_b(t))}{dt} = V_b(t) - r_b * i_b(t) - V_{tb}(t) \quad (3.38)$$

$$L \frac{d(i_c(t))}{dt} = V_c(t) - r_c * i_c(t) - V_{tc}(t) \quad (3.39)$$

La corriente en el lado de CD del circuito de la **Fig. 3-9**, se puede definir como:

$$I_{CDa}(t) = i_a(t) * m_a(t) \quad (3.40)$$

$$I_{CDb}(t) = i_b(t) * m_b(t) \quad (3.41)$$

$$I_{CDc}(t) = i_c(t) * m_c(t) \quad (3.42)$$

Donde: m_a , m_b y m_c son las señales de modulación.

$$I_{CD}(t) = I_{CDa}(t) + I_{CDb}(t) + I_{CDc}(t) \quad (3.43)$$

Las dinámicas del puerto de CD pueden ser representadas por una fuente de corriente cuya corriente fluya por la fuente de CD. La ecuación (3.44) representa un modelo promedio del VSC en forma vectorial [47], para $i = \epsilon \{a, b, c\}$;

$$L \frac{d(i_i(t))}{dt} = V_i(t) - r_i * i_i(t) - V_{ti}(t) \quad (3.44)$$

El modelo promediado del convertidor se presenta en la **Fig. 3-10** con base en los sistemas de ecuaciones de (3.34), (3.35) y (3.36):

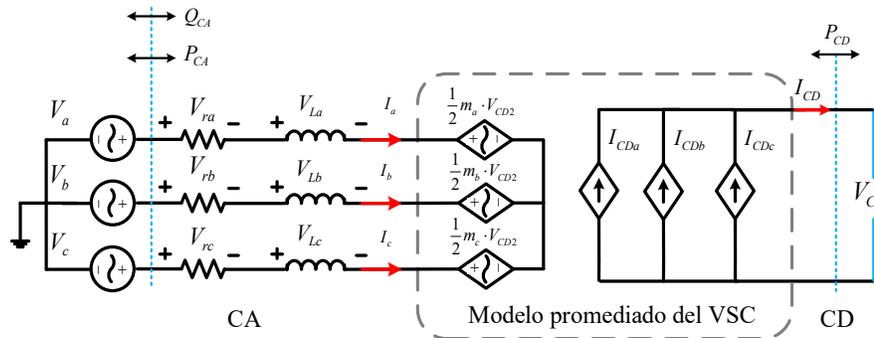


Fig. 3-10 Modelo promediado de un convertidor VSC de seis pulsos.

Combinando estas representaciones del lado de CA (V_i) y del lado de CD (V_{CD}), se representa el modelo promediado del convertidor.

3.3.2 Control de potencia activa y reactiva por corrientes

La implementación de un esquema de control de corrientes representa un paso esencial para la operación de cualquier VSC interconectado a la red de distribución, donde dicho control regula el flujo bidireccional de la potencia entre la red y el VSC. El control de la corriente se implementa con base a la teoría del marco de referencia giratorio dq0, tomando como referencia la señal de un lazo de fase encadenada (PLL, por sus siglas en inglés) [48].

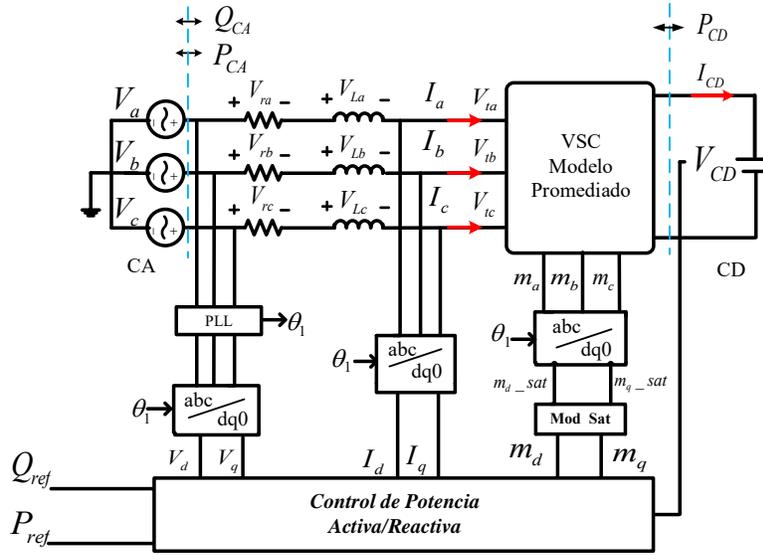


Fig. 3-11 Diagrama esquemático del control de potencia de un convertidor trifásico VSC.

Para iniciar el modelado y control, el lado de CD del VSC se conecta en paralelo con una fuente de CD ideal (V_{CD}). La **Fig. 3-11** muestra el diagrama básico de control de potencia del convertidor VSC conectado a la red, en V_i , a través de la impedancia L_i-r_i . Dicho control se implementa a través del índice de modulación SPWM (m_a, m_b, m_c), cuyas señales de modulación se toman como una variable promediada, facilitando el modelado del VSC [49].

Como una forma de reducir el número de variables para el control, el VSC propuesto utiliza el marco de referencia rotativo DQ0, a través de la transformación de Park (ABC a DQ0), para facilitar el diseño del esquema de control [50]. Las ecuaciones (3.45) y (3.46) muestran el dominio dq0.

$$L \frac{d(I_d(t))}{dt} = +\omega L * I_q(t) - r * I_d(t) + V_{td}(t) - V_d(t) \quad (3.45)$$

$$L \frac{d(I_q(t))}{dt} = -\omega L * I_d(t) - r * I_q(t) + V_{tq}(t) - V_q(t) \quad (3.46)$$

Donde:

$$V_{td}(t) = \frac{1}{2} V_{CD} * m_d(t) \quad (3.47)$$

$$V_{tq}(t) = \frac{1}{2} V_{CD} * m_q(t) \quad (3.48)$$

Donde la relación entre las variables m_d, m_q y m_a, m_b y m_c , viene dada por la aplicación de la transformación dq0, que se ha reducido de tres a dos variables, transformándolas en señales invariantes en el tiempo o señales de CD [51], haciendo $L = L_d = L_q$.

La presencia de ωL en (3.45) y (3.46) indica la dinámica de acoplamiento entre I_d y I_q . Para desacoplar tal dinámica, se cambian m_d y m_q , basados en la teoría dq0:

$$m_d(t) = \frac{2}{V_{CD}} [u_d - (\omega L * I_q(t)) + V_d(t)] \quad (3.49)$$

$$m_q(t) = \frac{2}{V_{CD}} [u_q + (\omega L * I_d(t)) + V_q(t)] \quad (3.50)$$

Donde u_d y u_q son dos entradas de control adicionales. Sustituyendo (3.47) y (3.48) en (3.49) y (3.50), respectivamente, se puede obtener un sistema lineal de primer orden. Las ecuaciones (3.51) y (3.52) describen el sistema basado en el VSC trifásico de seis pulsos.

$$L \frac{d(I_d(t))}{dt} = -r * I_d + u_d \quad (3.51)$$

$$L \frac{d(I_q(t))}{dt} = -r * I_q + u_q \quad (3.52)$$

La representación de las ecuaciones (3.51) y (3.52) en el dominio del tiempo se pueden expresar en el dominio de la frecuencia de acuerdo con (3.53) y (3.54), donde (3.53) corresponde a la corriente activa y (3.54) representa la corriente reactiva; controladas por $u_d(s)$ y $u_q(s)$, respectivamente.

$$L * sI_d(s) = -r * I_d(s) + u_d(s) \quad (3.53)$$

$$L * sI_q(s) = -r * I_q(s) + u_q(s) \quad (3.54)$$

Las ecuaciones (3.53) y (3.54) describen dos sistemas lineales de primer orden desacoplados. Usando ambas ecuaciones, se pueden controlar I_d e I_q manipulando u_d y u_q , respectivamente. De modo que el sistema pueda seguir los comandos de referencia de CD en lazo cerrado, es posible utilizar un control proporcional e integral (PI) [52], obteniendo así:

$$u_d(s) = k_d(s) = \left(I_{dref} - I_d(s) \right) \left[k_p \frac{(s + k_i/k_p)}{s} \right] \quad (3.55)$$

$$u_q(s) = k_q(s) = \left(I_{qref} - I_q(s) \right) \left[k_p \frac{(s + k_i/k_p)}{s} \right] \quad (3.56)$$

En (3.55) y (3.56), K_p y K_i son las ganancias proporcionales e integrales, respectivamente, y las ganancias de los lazos ($\ell_d(s)$) y ($\ell_q(s)$) se definen por:

$$\ell_d(s) = k_d(s) * I_d(s) = \frac{k_p}{sL_i} * \frac{(s+k_i/k_p)}{(s+r_i/L_i)} \quad (3.57)$$

$$\ell_q(s) = k_q(s) * I_q(s) = \frac{k_p}{sL_i} * \frac{(s+k_i/k_p)}{(s+r_i/L_i)} \quad (3.58)$$

Continuando con el análisis, el polo de (3.57) y (3.58) está en $s = -r/L$, cuya vecindad está cercana al origen. Como consecuencia, la magnitud y la fase de la ganancia de lazo comienza a decaer desde una frecuencia relativamente baja (relación de frecuencia entre L y r) [53]. Para evitar esto, primero se compensa el polo de la planta por un cero en $s = -k_i/k_p$. En esta condición, la ganancia del lazo tiene la forma $\ell(s) = k_p/(sL_i)$. Por lo tanto, la función de transferencia del lazo cerrado se convierte en, $\ell_d(s)/(\ell_d(s) + 1)$, donde los comandos de referencia en CD son:

$$\frac{I_d(s)}{i_{dref}(s)} = \frac{\ell_d(s)}{\ell_d(s)+1} = \frac{1}{\tau_i * s + 1} \quad (3.59)$$

$$\frac{I_q(s)}{i_{qref}(s)} = \frac{\ell_q(s)}{\ell_q(s)+1} = \frac{1}{\tau_i * s + 1} \quad (3.60)$$

Donde τ_i es el tiempo de respuesta del compensador de lazo cerrado de primer orden. Las ganancias k_p y k_i se pueden definir como:

$$k_p = \frac{1}{\tau_i} * L_i \quad (3.61)$$

$$k_i = \frac{1}{\tau_i} * r_i \quad (3.62)$$

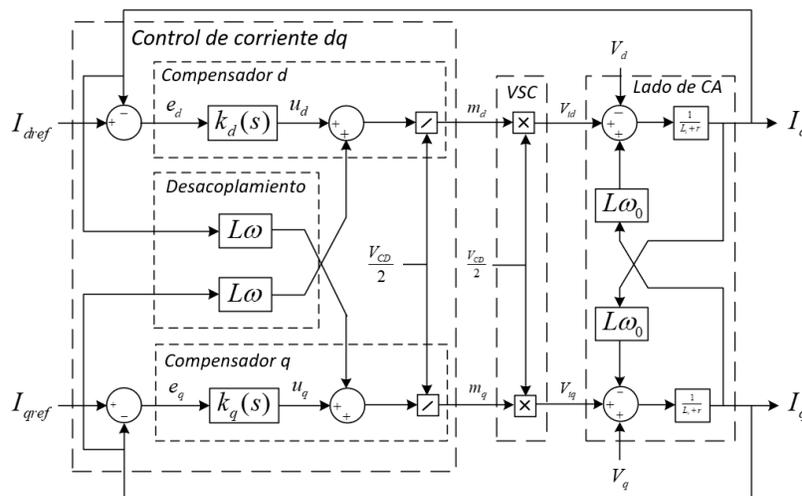


Fig. 3-12 Control de corriente del VSC.

Con base en la teoría de control de la potencia activa y reactiva, para el marco de referencia dq0, mostrado en [54], la potencia activa y reactiva en el VSC se definen por:

$$P(s) = \frac{3}{2} [V_d * I_d(s) + V_q * I_q(s)] \quad (3.63)$$

$$Q(s) = \frac{3}{2} [-V_d * I_q(s) + V_q * I_d(s)] \quad (3.64)$$

Donde V_d y V_q son las componentes de voltaje en dq del sistema de CA, ajenas al VSC por lo que no pueden ser controladas por este sistema. Asumiendo que el PLL está en estado estable, entonces $V_q = 0$, y si el sistema de control puede proporcionar un seguimiento de la referencia más rápido, entonces $I_d(s) \approx I_{dref}$ y $I_q(s) \approx I_{qref}$, $P(s) \approx P_{ref}$, y $Q(s) \approx Q_{ref}$. Por lo tanto, (3.63) y (3.64) se pueden reescribir como:

$$I_{dref} \approx \frac{2}{3V_d} P_{ref} \quad (3.65)$$

$$I_{qref} \approx -\frac{2}{3V_q} Q_{ref} \quad (3.66)$$

La Fig. 3-13 muestra el control de la potencia activa y reactiva para el sistema de la Fig. 3-11, donde P_{ref} y Q_{ref} son referencias de CD y m_d y m_q son las variables de modulación mostradas en el sistema de acoplamiento cruzado por ω_L .

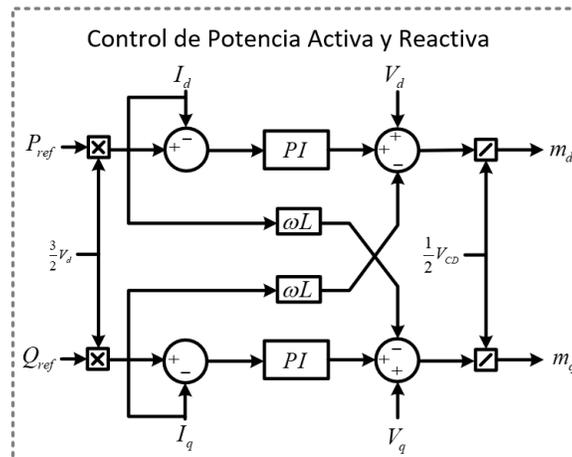


Fig. 3-13 Diagrama a bloques del control de potencia.

La Fig. 3-14 muestra la respuesta del control de potencia implementado para un sistema de 100 kVA, en donde las referencias de corriente vienen dadas por referencias de potencia que simplemente se dividen entre el voltaje de operación del VSC para obtener las corrientes de referencia.

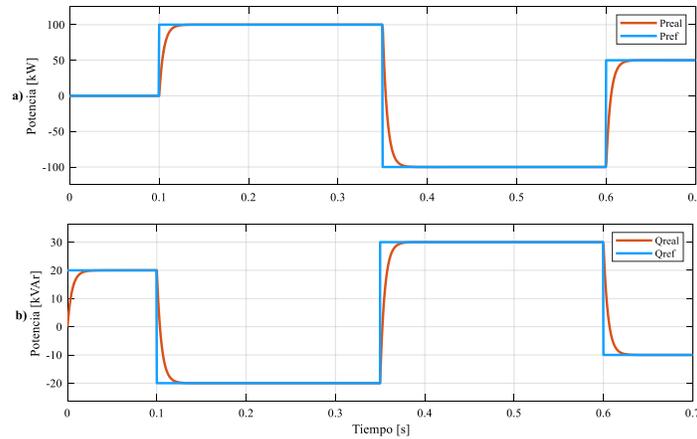


Fig. 3-14 Respuesta del VSC para el control de potencia.

Como se observó en la **Fig. 3-14**, las potencias en el VSC siguen el comportamiento de las referencias dadas por escalonamientos en la potencia activa y reactiva.

3.3.3 Regulación de voltaje de CD

Otro de los métodos de control del VSC más utilizado es el modo de control de voltaje, que se aplica en operaciones y procesos de alto voltaje, generalmente industriales. Éste es un método sencillo que posee pocos lazos de control. Sin embargo, uno de sus principales problemas es la ausencia de un lazo cerrado de control de corriente.

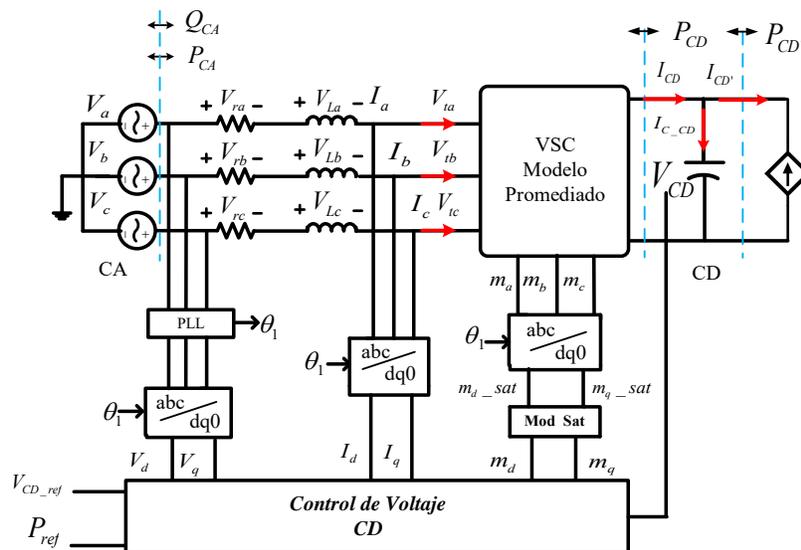


Fig. 3-15 Diagrama esquemático del control de voltaje de un convertidor trifásico VSC.

En la vida real las fuentes de CD ideales no existen, pero se puede simular su operación controlando la energía de un capacitor. En la **Fig. 3-15** se representa un capacitor ideal sometido a la sumatoria de corrientes ($I_{C_CD} = I_{CD} - I_{CD}'$). La energía almacenada en el capacitor C del lado de CD es:

$$W_{CD} = \frac{1}{2} C * V_{CD}^2 \quad (3.67)$$

Donde W_{CD} depende de la potencia de entrada al circuito de CD, P_{CD} , y la potencia a la salida, P_{CD}' , esto es:

$$\frac{dW_{CD}}{dt} = \frac{1}{2} C \frac{dV_{CD}^2}{dt} = -P_{CD}(t) - P_{CD}'(t) \quad (3.68)$$

$P_{CD}(t)$ se define como:

$$P_{CD}(t) = I_{CD}(t) * V_{CD}(t) \quad (3.69)$$

$P_{CD}'(t)$ se define como:

$$P_{CD}'(t) = I_{CD}'(t) * V_{CD}(t) \quad (3.70)$$

Resolviendo (3.67) y (3.68) para V_{CD} , y aplicando la transformada de Laplace se obtiene:

$$W_{CD}(s) = \frac{-P_{CD} - P_{CD}'}{\frac{1}{2}sC} \quad (3.71)$$

El modelo de la planta $W_{CD}(s)$, dado por (3.71), puede complementarse con un controlador $k_v(s)$, de modo que se pueda cerrar el lazo de control en el sistema.

$$k_v(s) = - \left((V_{CDref})^2 - (V_{CD})^2 \right) \left[k_{vp} \frac{(s + k_{vi}/k_{vp})}{s} \right] \quad (3.72)$$

Como recomendación general, el tiempo de respuesta del lazo de control de voltaje se establece con un valor 10 veces menor que el tiempo de respuesta del lazo de control de corriente, de esta forma se asegura que la dinámica de la respuesta del control de voltaje no sea afectada por el control de corriente:

$$k_{vp} = \frac{k_p}{10} \quad (3.73)$$

$$k_{vi} = \frac{k_i}{10} \quad (3.74)$$

En la **Fig. 3-16** se muestra el diagrama de control de voltaje implementado al modelo del VSC que se muestra en la **Fig. 3-15**.

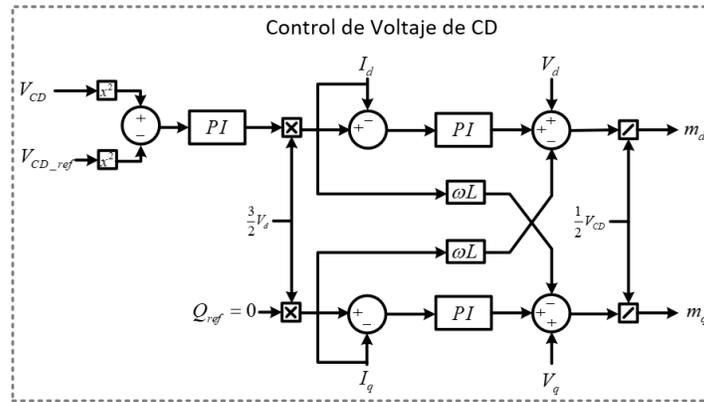


Fig. 3-16 Diagrama a bloques del control de voltaje.

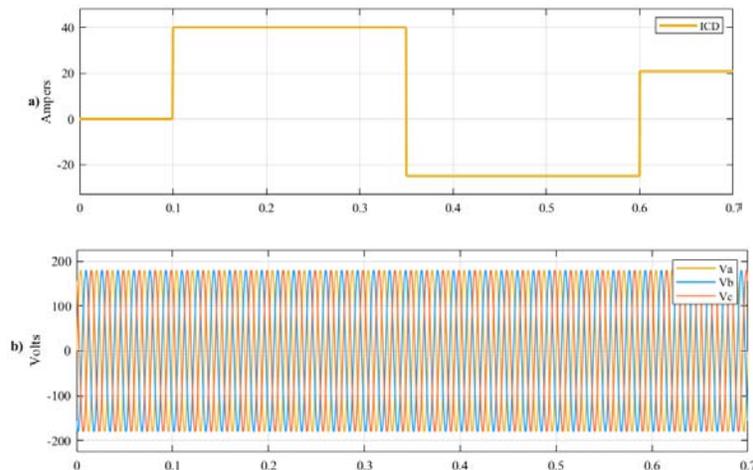
Las gráficas de la Fig. 3-17 muestran el comportamiento de las variables de voltaje y corriente en el VSC para una prueba del control de voltaje.

La gráfica a) de la Fig. 3-17 muestra el comportamiento de la demanda de corriente de la fuente de CD.

Por otro lado, en la gráfica b) de la Fig. 3-17 se muestra el comportamiento del puerto de CA, en donde las señales de voltaje trifásico no se ven afectadas por las variaciones en la demanda de corriente del lado de CD.

En la gráfica c) de la Fig. 3-17 se observa el comportamiento de la corriente que demanda la fuente de corriente de CD vista desde el puerto de CA.

Finalmente, en la gráfica d) de la Fig. 3-17 se observa el comportamiento del voltaje en el puerto de CD, es decir el voltaje en el capacitor, que presentó pequeños transitorios durante los cambios en la corriente demandada por la fuente externa.



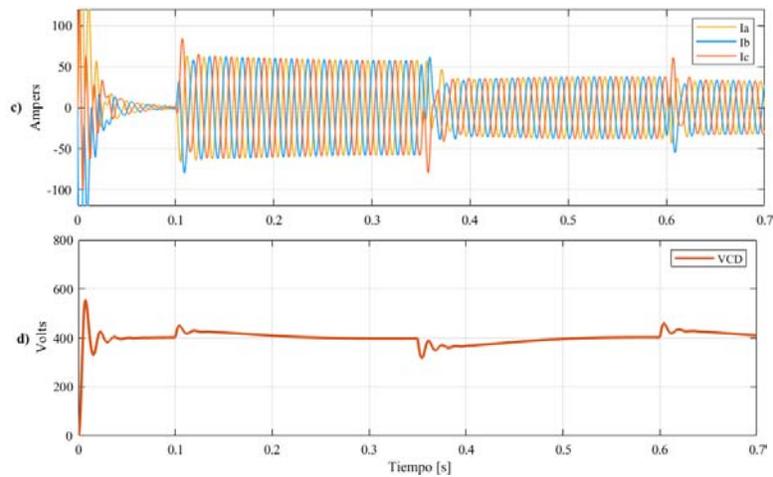


Fig. 3-17 Respuesta del VSC para el control de voltaje.

De acuerdo con lo descrito en este capítulo, el convertidor VSC puede operar como controlador del flujo de potencia, así como regulador de voltaje, debido a su gran flexibilidad de operación. Sin embargo, las simulaciones realizadas para sustentar el funcionamiento de los controladores se realizaron de forma independiente, es decir, no operaron de forma simultánea, con el propósito de garantizar el mejor funcionamiento de los controladores. Para el sistema descrito en el capítulo 4, se hace esta consideración de tal forma que el VSC se encarga únicamente de manipular la potencia reactiva y el DAB de controlar la potencia activa.

3.4 Operación en conjunto del BESS

Los objetivos de implementar un BESS en la red son principalmente, para efectos de esta tesis, i) reducir el pico de la demanda, ii) corregir el factor de potencia, iii) regular el voltaje y iv) demostrar su funcionamiento en modo aislado.

Para demostrar el funcionamiento del BESS, se implementaron los modelos matemáticos del DAB y del VSC, descritos anteriormente, en el entorno de desarrollo de simulaciones Simulink. Las simulaciones presentadas en este capítulo describen el funcionamiento del BESS, así como las curvas características de los parámetros eléctricos propios de los elementos que conforman al BESS para el caso de un sistema con una capacidad de 75 kVA, que obedece a la curva de demanda de potencia residencial. En la **Fig.**

3-18 se muestra el diagrama de bloques de los elementos que conforman al BESS y las conexiones implementadas para el sistema que se simuló en este trabajo.

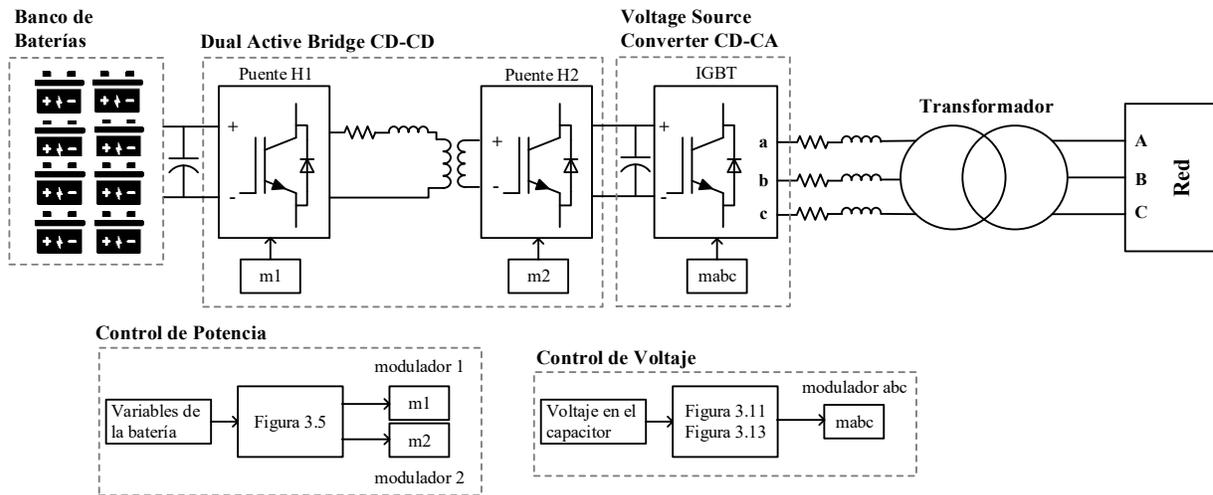


Fig. 3-18 Diagrama a bloques del BESS.

El BESS se conecta en derivación a una red de CA a través de un transformador y las impedancias de acoplamiento necesarias como se muestra en la Fig. 3-19.

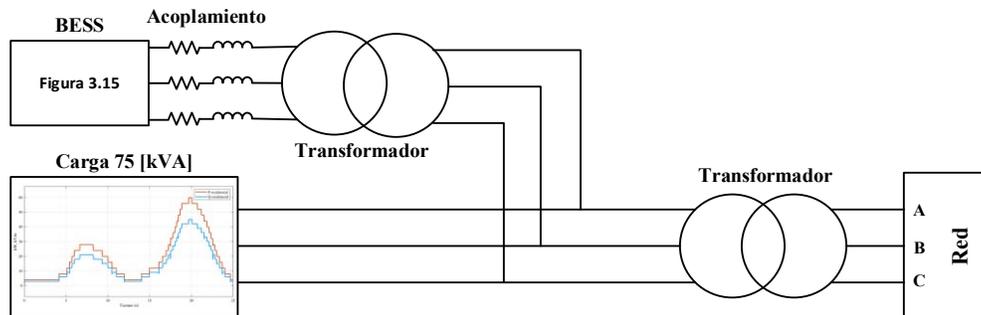


Fig. 3-19 Diagrama de conexión del BESS a la red.

El modelo de batería de Simulink, descrito en el Capítulo 3, se implementó en el sistema a través del bloque “Battery”, el cual consiste en una aproximación general del comportamiento de las baterías más comunes, con la opción de añadir efectos de temperatura y de envejecimiento que, para fines de esta tesis, no son prácticos. El modelo utilizado representa un arreglo de baterías de Li-Ion de 120 V de CD. Su comportamiento se muestra en la Fig. 3-20.

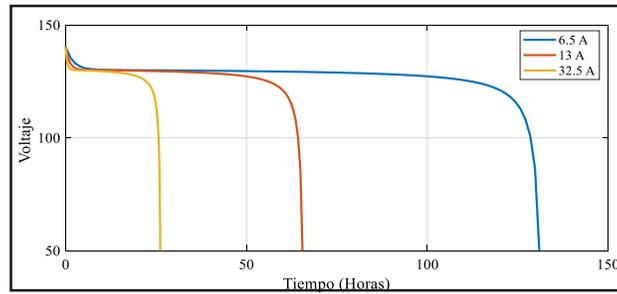


Fig. 3-20 Curvas de voltaje en la batería.

El DAB implementado para este sistema opera con una tensión de 120 V de CD en el puerto que se conecta al banco de baterías y con una tensión de 2400 V de CD en el puerto que se conecta al VSC. La frecuencia de conmutación del DAB es de 1000 Hz. Por último, el esquema de simulación propuesto utiliza el modelo promediado del VSC, que permite acoplar el puerto de CD del DAB a la red de CA, es decir, hace las veces de inversor cuando la energía fluye del banco de baterías a la red y funciona como rectificador para el caso contrario. Las simulaciones desarrolladas en este capítulo parten de la operación del sistema conectado a una carga residencial, cuyo comportamiento se observa en la **Fig. 3-21**. La curva de demanda energética residencial describe la potencia instantánea que demanda una carga a la red eléctrica en un periodo de 24 horas. El comportamiento de esta curva no es constante ya que existen diversos factores que intervienen en su definición. En esta curva destaca un periodo de tiempo de máxima demanda de potencia al que se le conoce como el pico de demanda, que se da alrededor de las 8 p.m. Durante este periodo los sistemas trabajan a su máxima capacidad para poder satisfacer la demanda de potencia, lo cual acelera el proceso de desgaste de los equipos eléctricos. Generalmente para estos sistemas se trabaja con curvas de un día en adelante, que prevén estadísticamente el comportamiento que tendrá la demanda energética al día siguiente.

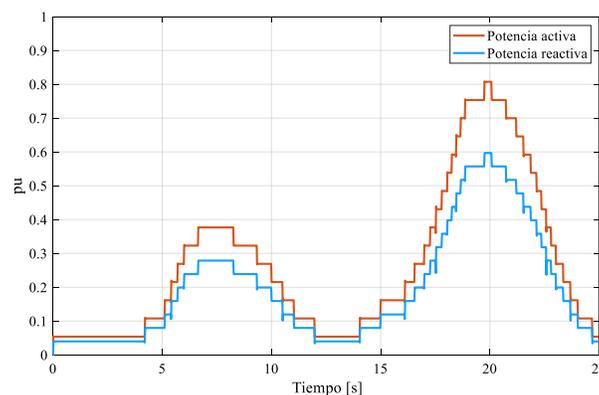


Fig. 3-21 Demanda de potencia residencial.

3.4.1 Simulación

En este apartado se muestra el comportamiento de los parámetros característicos del BESS, tanto en valores instantáneos como en valores promediados, con lo que se pretende sustentar el funcionamiento del modelo desarrollado en Simulink.

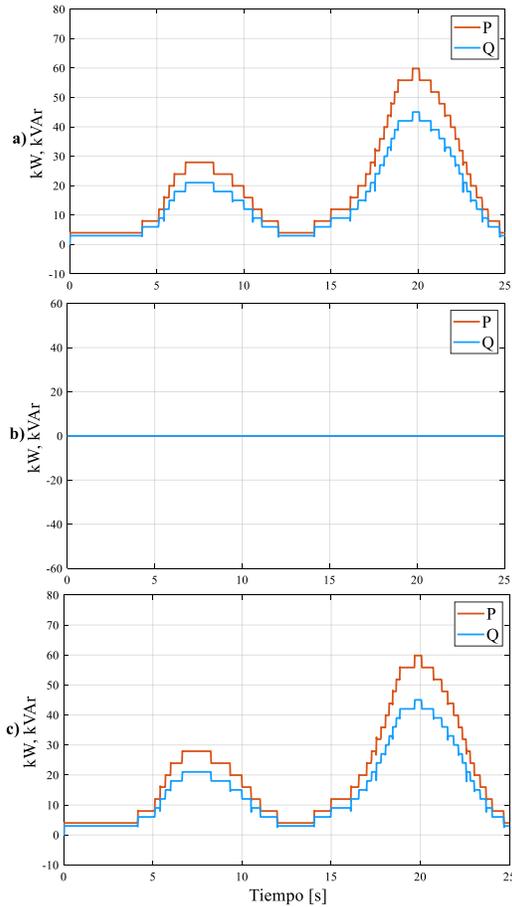


Fig. 3-22 Red con BESS fuera de operación.

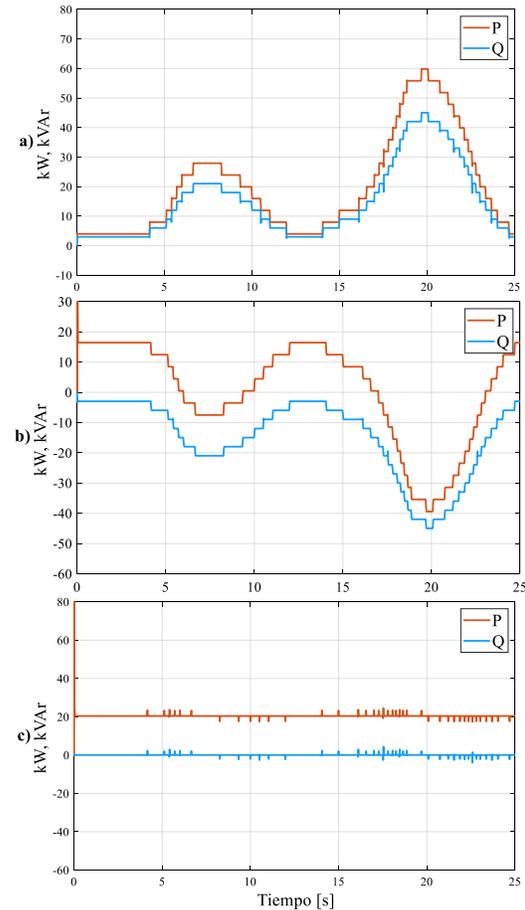


Fig. 3-23 Red con BESS en operación.

Las curvas a) de la **Fig. 3-22** y **Fig. 2-23** muestran el comportamiento de las potencias vistas desde el nodo de carga para el sistema mostrado en la **Fig. 3-19**. En el caso de las curvas b), mostradas en las mismas figuras, se observa la inyección de potencia que realiza el BESS. Finalmente, en las curvas c) de la **Fig. 3-22** y **Fig. 2-23** se puede observar el comportamiento de la potencia vista desde la red. Con la operación del BESS dentro de la red eléctrica se pudo reducir el pico de la demanda de potencia, a la vez que se corrigió el factor de potencia. De esta forma se demuestra, que el sistema permite el flujo bidireccional de potencia y cumple con las características deseadas.

En la **Fig. 3-24** se muestran los valores instantáneos de las señales de control del del DAB y del VSC.

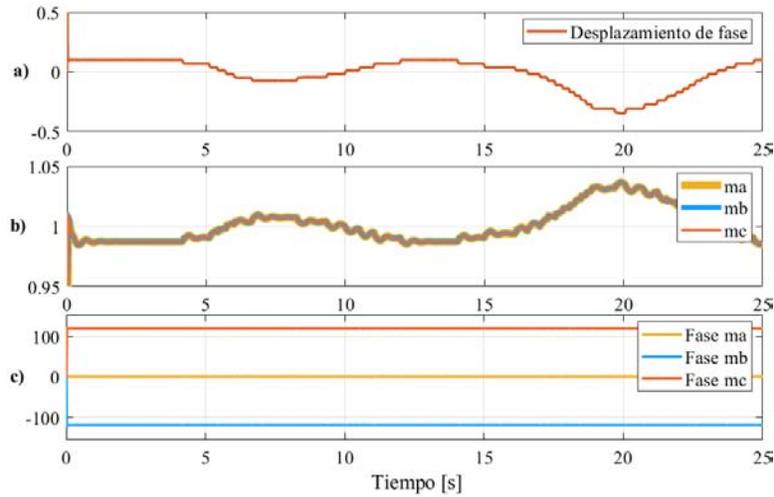


Fig. 3-24 Señales de control

a) Desplazamiento de fase, b) Magnitud de las moduladoras, c) Fase de las moduladoras

La gráfica a) de la **Fig. 3-24** muestra el comportamiento del desplazamiento de fase del voltaje VH2 que tiene el segundo puente-H en función del mando de potencia activa. Este desplazamiento está limitado entre 0 y $\pi/2$, que es donde se tiene la mínima y la máxima transferencia de potencia, respectivamente.

En la gráfica b) de la **Fig. 3-24** se puede observar la magnitud de las señales moduladoras del VSC, mientras que en la c) se observan las fases. Esta señal se obtiene a partir del control de corriente, descrito anteriormente.

En la **Fig. 3-25** se puede observar el comportamiento de las variables promediadas del BESS como las curvas de potencia del DAB y del VSC, así como sus perfiles de voltaje.

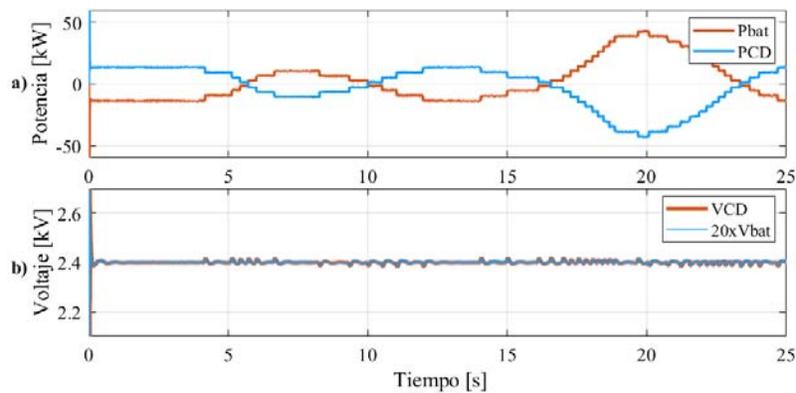


Fig. 3-25 Variables promediadas del BESS

a) Potencia de entrada y salida del DAB, b) Perfiles de tensión en el nodo de CD, c) Potencia activa y reactiva en el nodo de conexión del BESS

En la gráfica a) de la **Fig. 3-25** se observan las potencias de entrada y salida del DAB, que tienen sentidos inversos por tal motivo. La diferencia entre ambas potencias resulta en las pérdidas del DAB. Dado que este convertidor trabaja con CD, solo se tienen flujo de potencia activa. En la gráfica b) de a **Fig. 3-25** se muestra el perfil de voltaje en los puertos de CD, tanto en el lado de la batería como en el nodo de conexión del DAB y el VSC. El valor del voltaje de la batería se incrementa en 20 para poder compararlo con el voltaje de 2400 V del VSC.

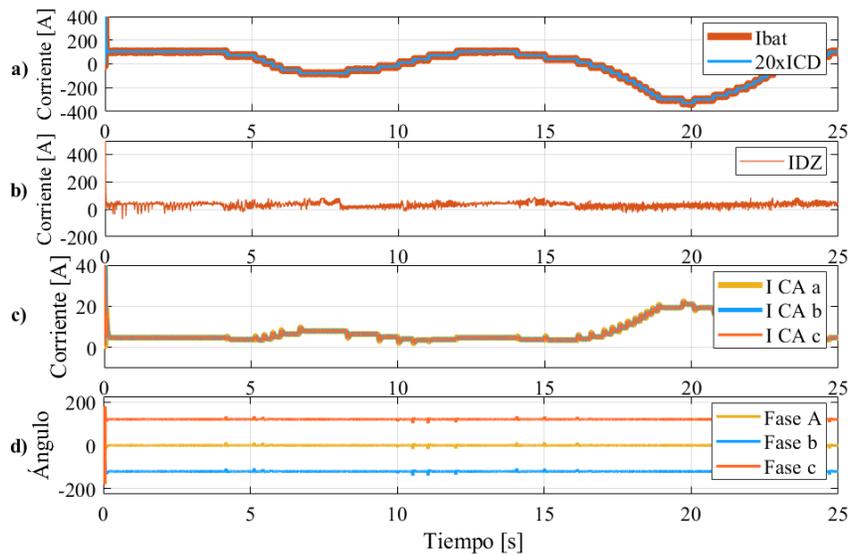


Fig. 3-26 Corrientes en el BESS

a) Corrientes en las terminales del DAB, b) Corriente en la impedancia del transformador de alta frecuencia, c) Corrientes en las terminales de CA del VSC, d) Ángulo de fase de las corrientes en las terminales de CA del VSC.

En la gráfica a) de la **Fig. 3-26** se muestran las corrientes en la batería y en el puerto de CD del VSC, de forma análoga a lo que se hizo con el voltaje en la **Fig. 3-25**, la corriente del puerto de CD se incrementó en 20 para poderla comparar con la de la batería, y se puede observar que son prácticamente iguales.

La corriente CD y la corriente de CA presentan una similitud con el comportamiento de la potencia. Esto se debe a que los voltajes en los nodos de CD y de CA se mantienen casi constantes como se observa en la gráfica b) de la **Fig. 3-25**. La gráfica b) de la **Fig. 3-26** muestra el comportamiento de la corriente que fluye a través de la inductancia parásita del transformador de alta frecuencia, mientras que en la c) y d) se muestra el comportamiento de la corriente trifásica de CA en el puerto de conexión del BESS a la red, y sus respectivas fases.

CAPÍTULO 4

INTEGRACIÓN DEL BESS A UNA MICRORRED

4.1 Definición de microrred

De acuerdo con el Departamento de Energía de EE. UU. (DOE), una microrred es un grupo de cargas interconectadas y fuentes de energía distribuidas dentro de límites eléctricos claramente definidos que actúa como una sola entidad controlable con respecto de la red. Puede conectarse o desconectarse de la red para permitir que funcione en modo conectado o en modo aislado a la red. De esa manera, proporciona un sistema de energía más flexible y confiable [55].

La capacidad de integrar diferentes tipos de recursos energéticos distribuidos y generadores, como energías renovables, sistemas de almacenamiento y microturbinas, mejora la sostenibilidad y la eficiencia de la microrred en general.

La red eléctrica inteligente (SG, Smart Grid), es otro concepto que de igual forma ha sido muy recurrente durante estos últimos años y que por ende llega a complicar la definición de una microrred. Las llamadas redes eléctricas inteligentes, al igual que las microrredes, pueden incorporar la misma tecnología, así como generación distribuida, almacenamiento de energía, energías renovables, incluso mediciones inteligentes. De hecho, una microrred puede ser una red inteligente, siempre y cuando sea gestionable a partir de mediciones, y a menudo se consideran una parte integral de cualquier red inteligente [56]. A pesar de estas similitudes, tanto en términos de tecnología y desarrollo de resiliencia en los recursos del sistema, las redes inteligentes generalmente son impulsadas de arriba hacia abajo por empresas de servicios públicos u organizaciones similares. Por el contrario, las microrredes suelen ser un modelo de abajo hacia arriba impulsado por clientes, empresas, organizaciones y comunidades, con control local [57][58].

4.2 Implementación del BESS

El BESS diseñado, modelado y simulado en este trabajo de tesis es un sistema que puede ser de pequeña y mediana escala, adecuado para su integración en redes con capacidades similares, como las redes de distribución o microrredes, ya que de esta forma

sus efectos se verán reflejados de manera directa sobre estas [59]. En este capítulo se presentan cinco casos de estudio que corresponden a: i) reducción del pico de demanda, ii) corrección del factor de potencia, iii) regulación de voltaje, iv) reducción del pico de demanda y regulación de voltaje y v) operación en modo aislado.

4.2.1 Análisis paramétricos

Todos los casos de estudio fueron implementados en la microrred que se muestra en la **Fig. 4-1**, la cual posee cinco cargas dinámicas, una industrial, dos comerciales y dos residenciales. Todas operan con un factor de potencia de 0.8 y están representadas por sus curvas de demanda de potencia respectivas. La red diseñada para la simulación de los casos de estudio propuestos, posee elementos resistivos e inductivos que representan pérdidas de potencia real y reactiva, respectivamente. La **Tabla 4-1** indica el código de colores utilizado en la **Fig. 4-1** para identificar las cargas y sus capacidades.

Tabla 4-1 Cargas en la microrred.

	Industrial	[20 MVA]
	Comercial 1	[5 MVA]
	Comercial 2	[5 MVA]
	Residencial 1	[9.925 MVA]
	Residencial 2	[75 KVA]

Las bases de potencia utilizadas para el diseño de los sistemas BESS son las que se muestran en la **Tabla 4-1** y los valores de base de voltaje se muestran en la **Tabla 4-2**.

Tabla 4-2 Voltajes de las cargas.

	Industrial	[115 kV]
	Comercial 1	[13.8 kV]
	Comercial 2	[220 V]
	Residencial 1	[220 V]
	Residencial 2	[220 V]

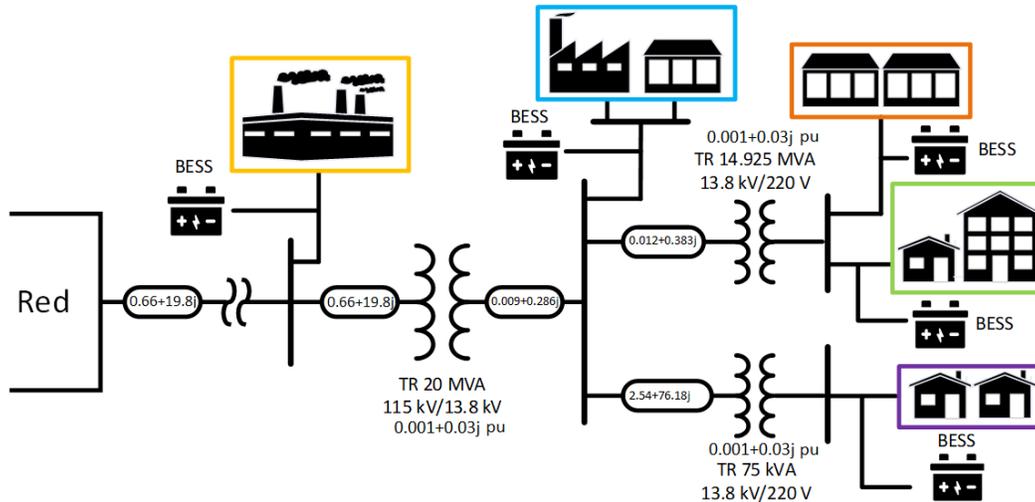


Fig. 4-1 Microrred con diferentes tipos de cargas y sistemas BESS.

Las curvas de demanda de potencia utilizadas en las cargas dinámicas de la red de distribución se muestran en la **Fig. 4.1**.

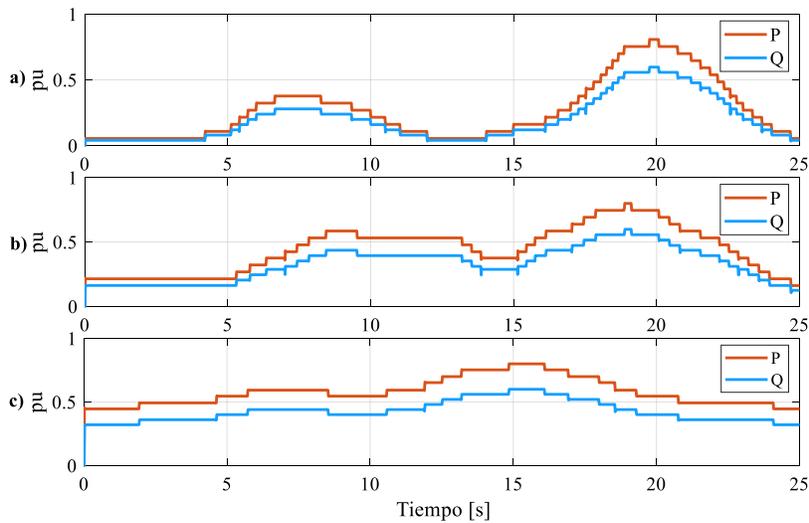


Fig. 4-2 Curvas de demanda de potencia
a) Demanda residencial, b) Demanda comercial, c) Demanda industrial.

La curva de demanda es una representación del comportamiento de la potencia acumulada de una serie de cargas durante de un periodo de 24 horas, que para efectos prácticos se simuló en 25 s. La forma de la curva dependerá del tipo de carga como se observa en la **Fig. 4-2**. Todas las curvas se caracterizan por tener un pico de demanda, que ocurre a diferentes horas dependiendo de la actividad que representen.

4.3 Caso I. Reducción del pico de la demanda

El pico de demanda representa un punto de operación en el que los elementos del sistema eléctrico operan en valores cercanos a su máxima capacidad, e incluso superándola, lo que se traduce en un desgaste y deterioro de estos elementos. Con la reducción del pico de demanda se hace una redistribución de la potencia a lo largo del día, de modo que se reduce o bien, en el mejor de los casos, desaparece el periodo de sobre operación del sistema eléctrico.

En las curvas a) y b) de la **Fig. 4-4** se puede observar el comportamiento de la potencia activa y reactiva, respectivamente, donde el pico de demanda de potencia no es coincidente para los distintos tipos de carga. Para hacer la reducción del pico de demanda, se optó por obtener el valor promedio de potencia activa de cada carga en la microrred de modo que pudiera ser usado como referencia para el control. Cuando la demanda instantánea de potencia está por debajo del valor promedio, el BESS absorbe la potencia excedente y viceversa, de modo que la demanda de potencia se aplanas sobre su correspondiente referencia de potencia, en este caso la potencia promedio.

La potencia inyectada y absorbida por los BESS, necesaria para reducir los picos de demanda de las cargas, se observa en **Fig. 4-4 c)**.

Para hacer la reducción del pico de la demanda no es necesario inyectar reactivos, por lo que la potencia reactiva es cero, como se observa en la gráfica d) de la **Fig. 4-4**.

Las curvas de potencia reducida se pueden observar en la gráfica e) y en la gráfica f) se tienen las potencias reactivas, las cuales no se alteraron, ambas gráficas pertenecientes a la **Fig. 4-4**.

En la gráfica g) de la **Fig. 4-4** se observan los perfiles de voltaje de las cargas, los cuales presentaron caídas considerables de voltaje debidas a las impedancias de las líneas y de los transformadores. La caída de voltaje se reduce conforma la carga está más cerca de la fuente de energía, ya que el sistema es más robusto en esos puntos.

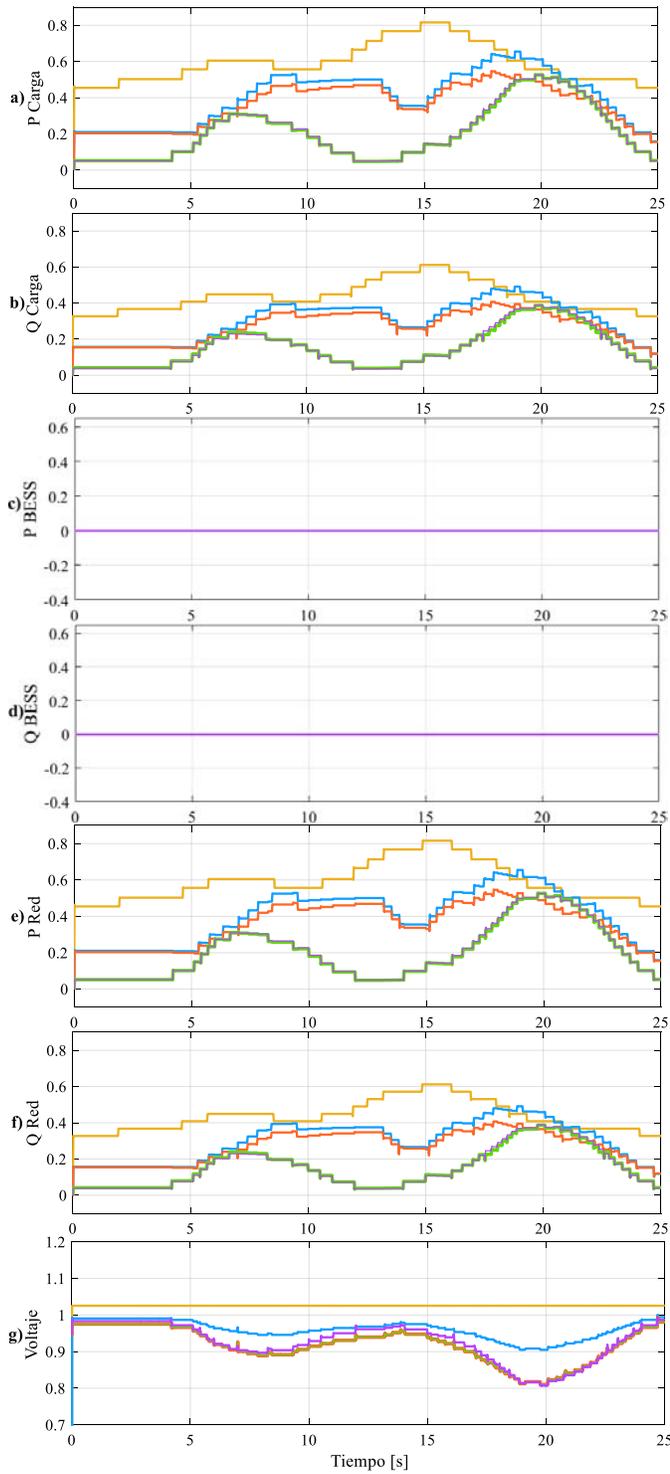


Fig. 4-3 Caso I. Red sin BESS.

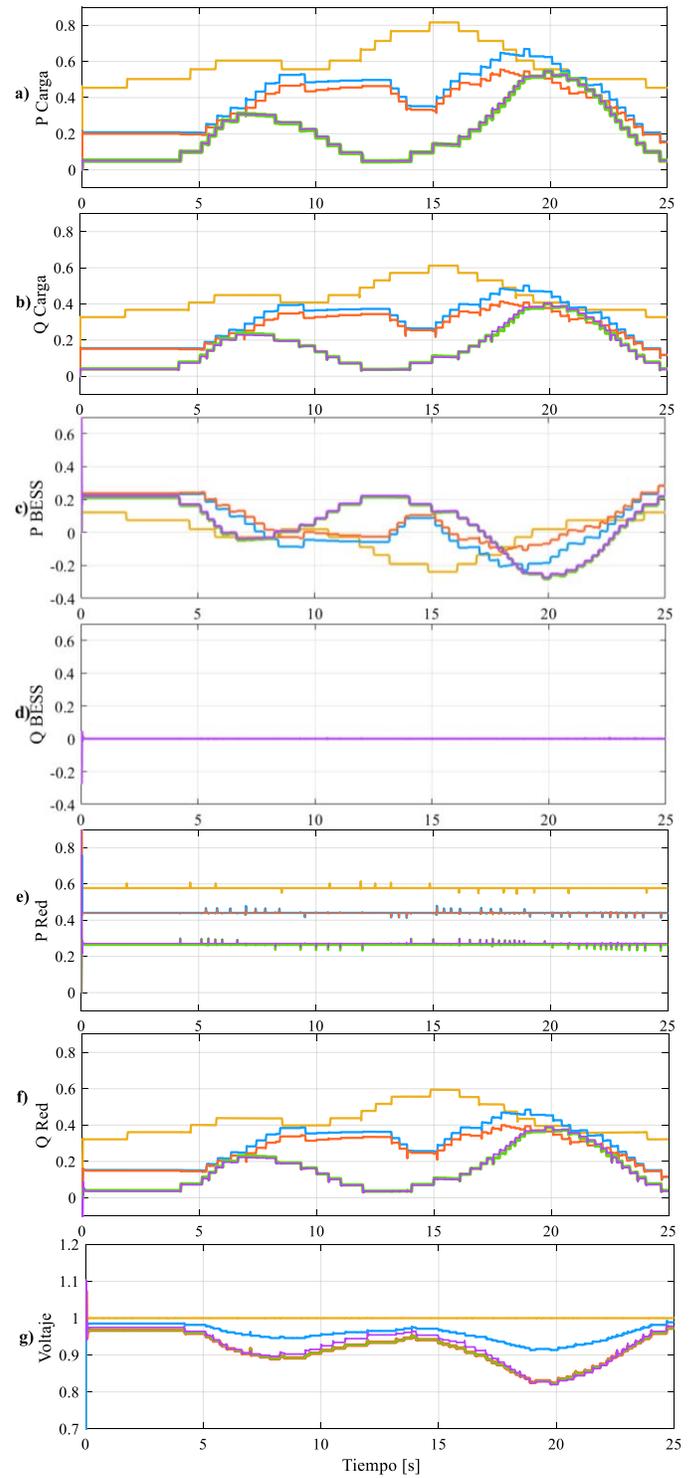


Fig. 4-4 Caso I. Red con BESS

4.4 Caso II. Corrección del factor de potencia

El factor de potencia se define como la relación que existe entre la potencia activa y la potencia aparente y se representa por la siguiente ecuación:

$$f.p. = \frac{P}{S} \quad (4.1)$$

De este modo, para mejorar el factor de potencia de una carga mayoritariamente inductiva es necesario inyectar potencia reactiva con el BESS, de modo que se pueda compensar la demanda de reactivos de la carga, reduciendo su potencia aparente y elevando su factor de potencia. Para este caso de estudio, se especificó un factor de potencia unitario como referencia, de tal forma que la potencia reactiva de las cargas vista desde la red es cero.

Inicialmente en la **Fig. 4-5** se puede observar la operación de la red sin la operación de los diferentes BESS, mientras que en la **Fig. 4-6** la operación de los BESS realiza la compensación del factor de potencia encada uno de los nodos de la red.

La gráfica a) de la **Fig. 4-6** muestra el comportamiento de la potencia activa de las cargas que, a diferencia del primer caso de estudio, se aproxima a los 8 pu. Esto se debe a la compensación de reactivos en la carga que reduce las caídas de tensión en los nodos de conexión de las cargas y por consiguiente eleva la potencia activa.

La potencia reactiva demandada por las cargas conserva su comportamiento como se observa en la gráfica b) de la **Fig. 4-6**.

En las gráficas c) y d) de la **Fig. 4-6** se pueden ver las aportaciones de potencia del BESS, donde ahora de forma complementaria, el BESS no suministra nada de potencia activa debido que para corregir el factor de potencia solo es necesario compensar con reactivos, por lo que toda la potencia reactiva que demanda la carga es suministrada por el BESS, como se muestra en la gráfica d) de la **Fig. 4-6**.

De esta forma, el flujo de potencia activa y reactiva de la carga y el BESS en conjunto se puede observar en las gráficas e) y f), respectivamente. Como se mencionó al inicio de este caso de estudio, hacer la compensación de reactivos incrementa la potencia activa de todas las cargas, debido a que las magnitudes de voltaje nodales se incrementan, por lo que las caídas de tensión en líneas y transformadores se compensan. Por consiguiente, el perfil de voltaje en las cargas se modificó se muestra en la gráfica g) de la **Fig. 4-6**, el cual puede ser directamente comparado con los perfiles de voltaje sin la acción de compensación del BESS en la gráfica g) de la **Fig. 4-5**.

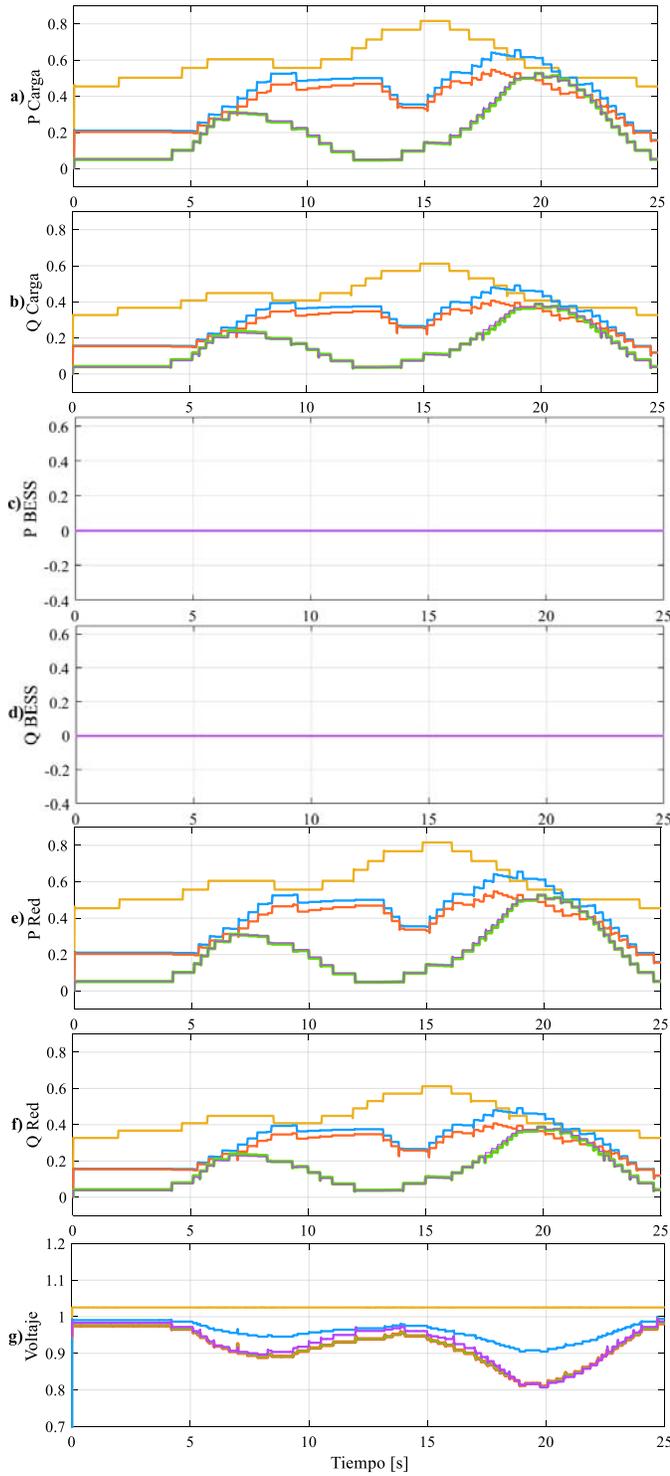


Fig. 4-5 Caso II. Red sin BESS.

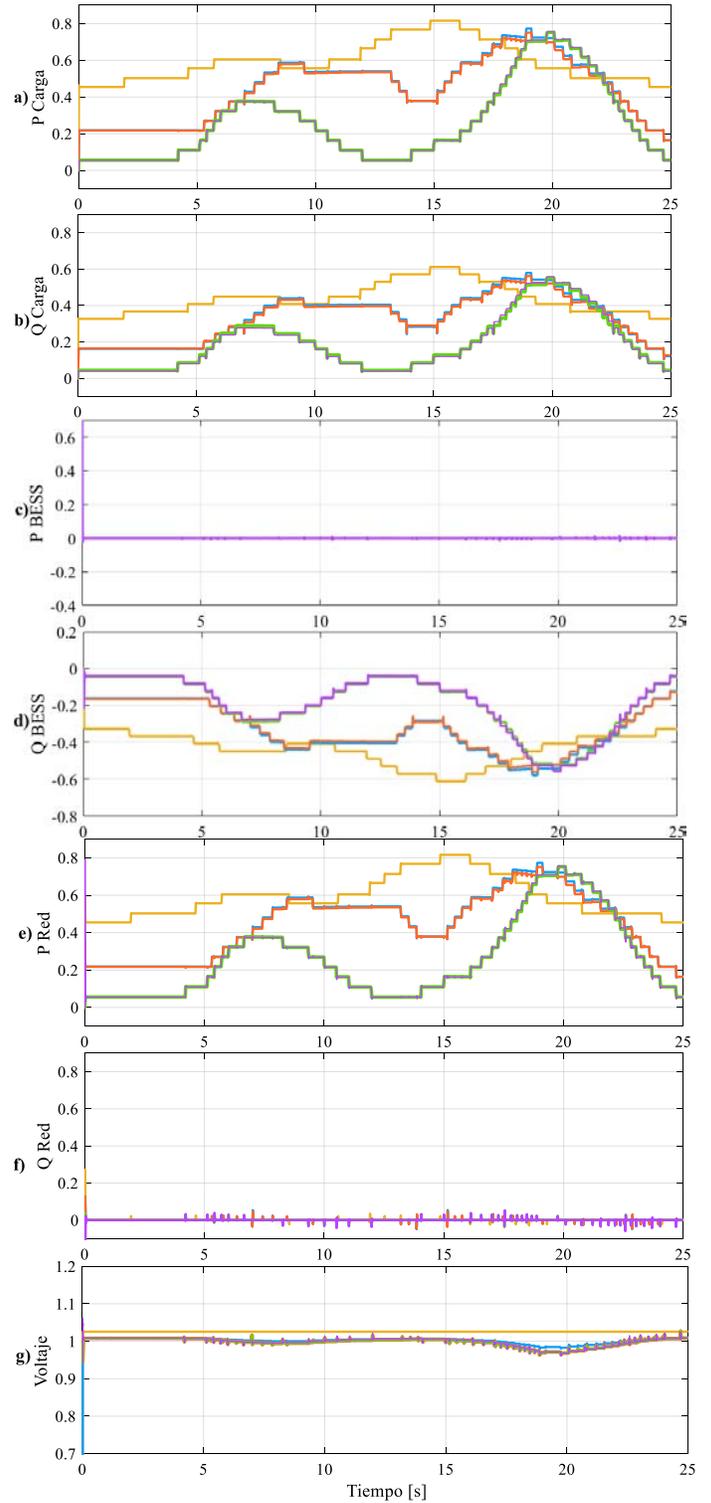


Fig. 4-6 Caso II. Red con BESS.

4.5 Caso III. Regulación del perfil de voltaje

De forma similar al segundo caso de estudio, la regulación de voltaje se realiza a través de la compensación de potencia reactiva. El control implementado para regular el voltaje es similar al que se utilizó para la corrección del factor de potencia, realizado a través del VSC. La diferencia radica en un controlador PI añadido a la entrada del mando de potencia reactiva del VSC, el cual utiliza una referencia de voltaje que se compara con el nivel de voltaje real en el nodo de conexión.

En la gráfica a) se puede observar la demanda de potencia activa de las cargas. Al regular el voltaje en los nodos de conexión, las cargas operan con sus voltajes nominales permitiendo que demanden realmente los 0.8 p.u. de potencia activa.

La potencia reactiva también alcanza su valor nominal de 0.6 pu, de acuerdo con la demanda de potencia de cada carga, al regular el perfil de voltaje en los nodos de conexión como se observa en la gráfica b) de la **Fig. 4-8**.

Para regular el voltaje solo es necesario controlar el flujo de potencia reactiva, por lo que el BESS no inyecta nada de potencia activa como se puede observar en la gráfica c).

Es importante aclarar que las pérdidas de potencia en la red se acentúan mientras mayor sea la distancia eléctrica entre la fuente de energía y la carga, es decir, las caídas de tensión crecen mientras la impedancia entre la fuente y la carga sea mayor, por lo que en la carga industrial se tiene un perfil de voltaje prácticamente plano y en las cargas residenciales un perfil con caídas de tensión grandes.

En la gráfica d) de la **Fig. 4-8** se puede observar la potencia reactiva que tiene que inyectar el BESS a la red para regular el perfil de voltaje de las cargas.

Al regular el perfil de voltaje de las cargas, las cargas pueden operar a su voltaje nominal, permitiendo que realmente consuman los 8 pu de potencia activa como se puede observar en la gráfica e) de la **Fig. 4-8**.

En la gráfica f) de la **Fig. 4-8** se muestra la potencia reactiva que inyectaron los BESS para poder regular el perfil de voltaje de las cargas.

Finalmente, los resultados de la regulación de voltaje se pueden observar en la gráfica g) de la **Fig. 4-8**, en donde todos los perfiles de voltaje se mantienen constantes en sus valores nominales durante todo el periodo de simulación.

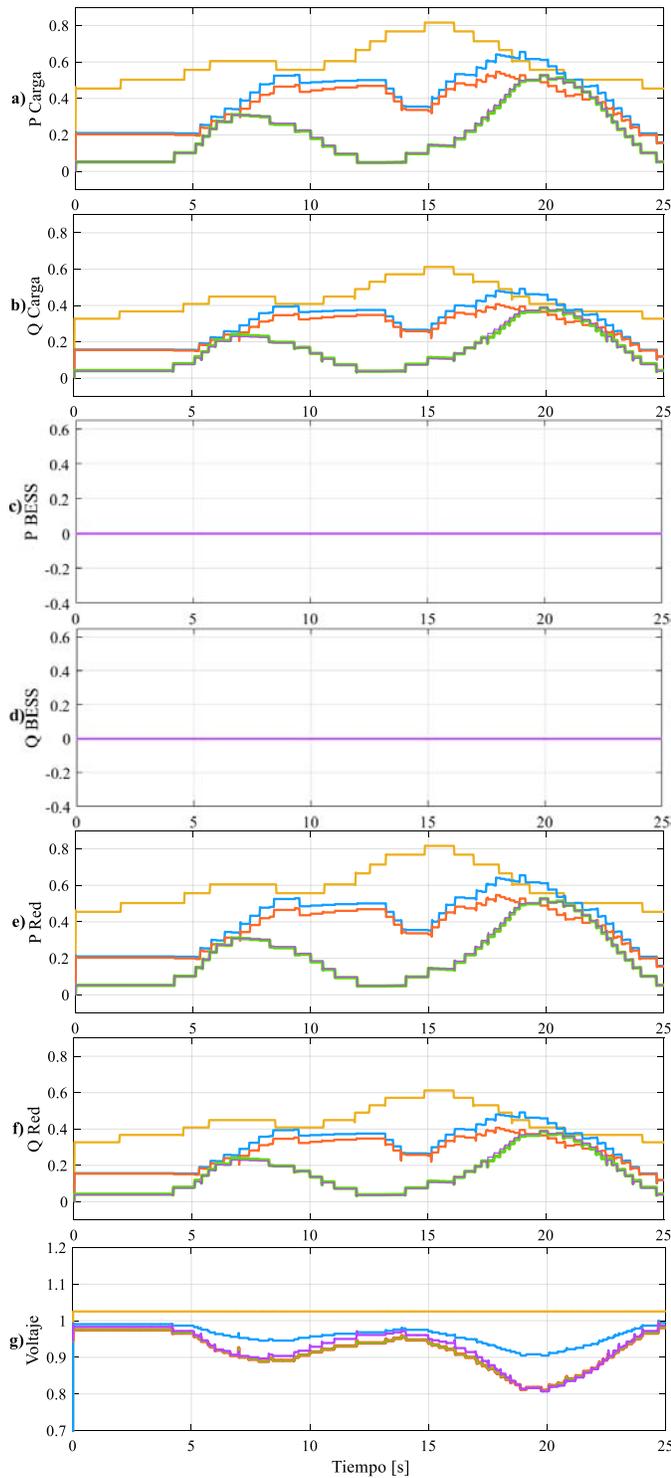


Fig. 4-7 Caso III. Red sin BESS.

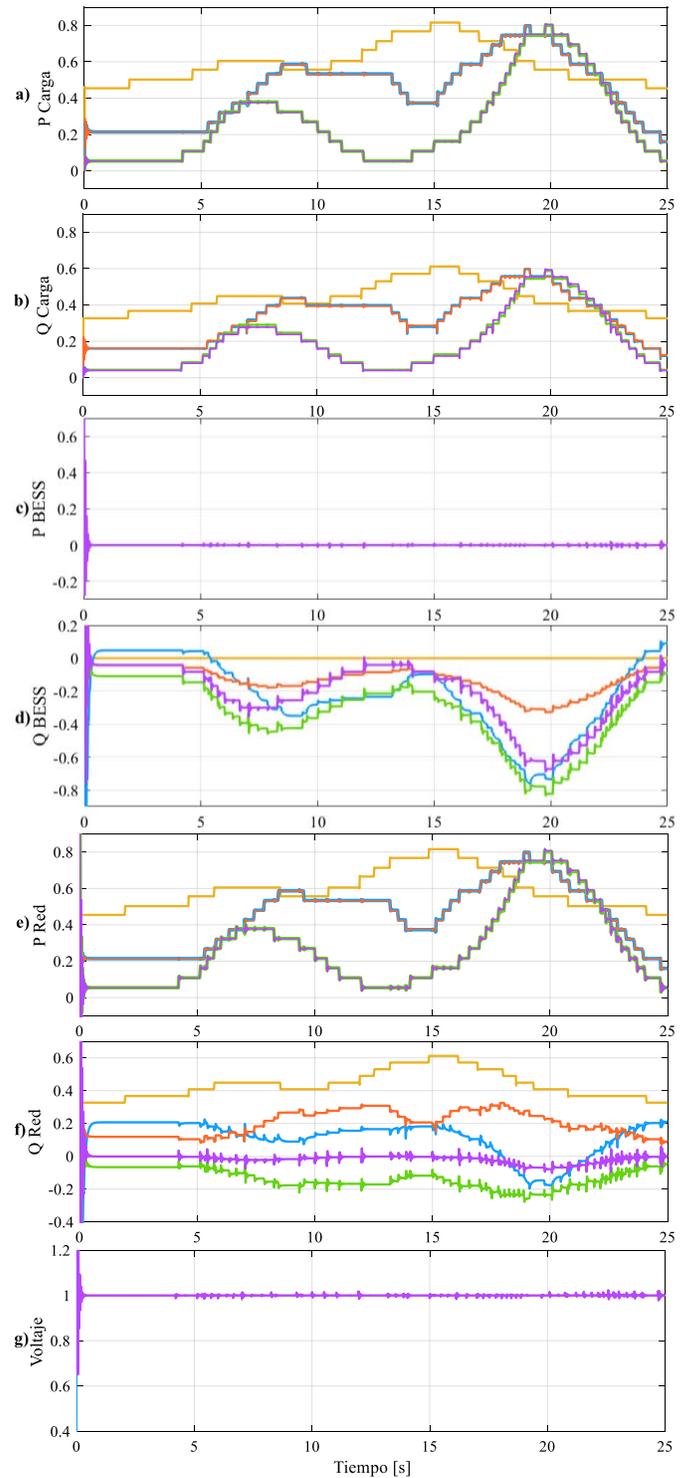


Fig. 4-8 Caso III. Red con BESS.

4.6 Caso IV. Reducción del pico de demanda y regulación del perfil de voltaje

En este caso de estudio se combinan los efectos de la reducción del pico de demanda y la regulación de voltaje analizados en caso de estudio I y II, respectivamente.

Como siempre, el grupo de gráficas de la **Fig. 4-9** representa el comportamiento de las potencias y el voltaje de las cargas en la red de distribución propuesta con el BESS fuera de operación.

En las gráficas a) y b) de la **Fig. 4-10** se puede observar el comportamiento de la potencia activa y reactiva, respectivamente.

La inyección de potencia activa necesaria para reducir y aplanar las curvas de potencia de las cargas se muestra en la gráfica c) de la **Fig. 4-10**. Las potencias de referencia utilizadas para la reducción del pico de demanda utilizadas en el primer caso de estudio fueron las mismas que se usaron para este caso.

Por otro lado, en la gráfica d) de la **Fig. 4-10** se observa la inyección de potencia reactiva del BESS necesaria para regular el perfil de voltaje de las cargas en sus nodos de conexión a la red.

En la gráfica e) se observan los perfiles de potencia activa de las cargas vistas desde la red, después de haber reducido los picos de demanda.

La potencia reactiva de las cargas vista desde la red se puede observar en la gráfica f) de la **Fig. 4-10**, y el comportamiento de estas potencias es muy similar al del tercer caso de estudio, ya que varía muy poco debido a la reducción de los picos de demanda de potencia activa.

Finalmente, en la gráfica g) de la **Fig. 4-10** se observa el perfil de voltaje de las cargas que se mantiene constante sobre sus valores nominales de voltaje.

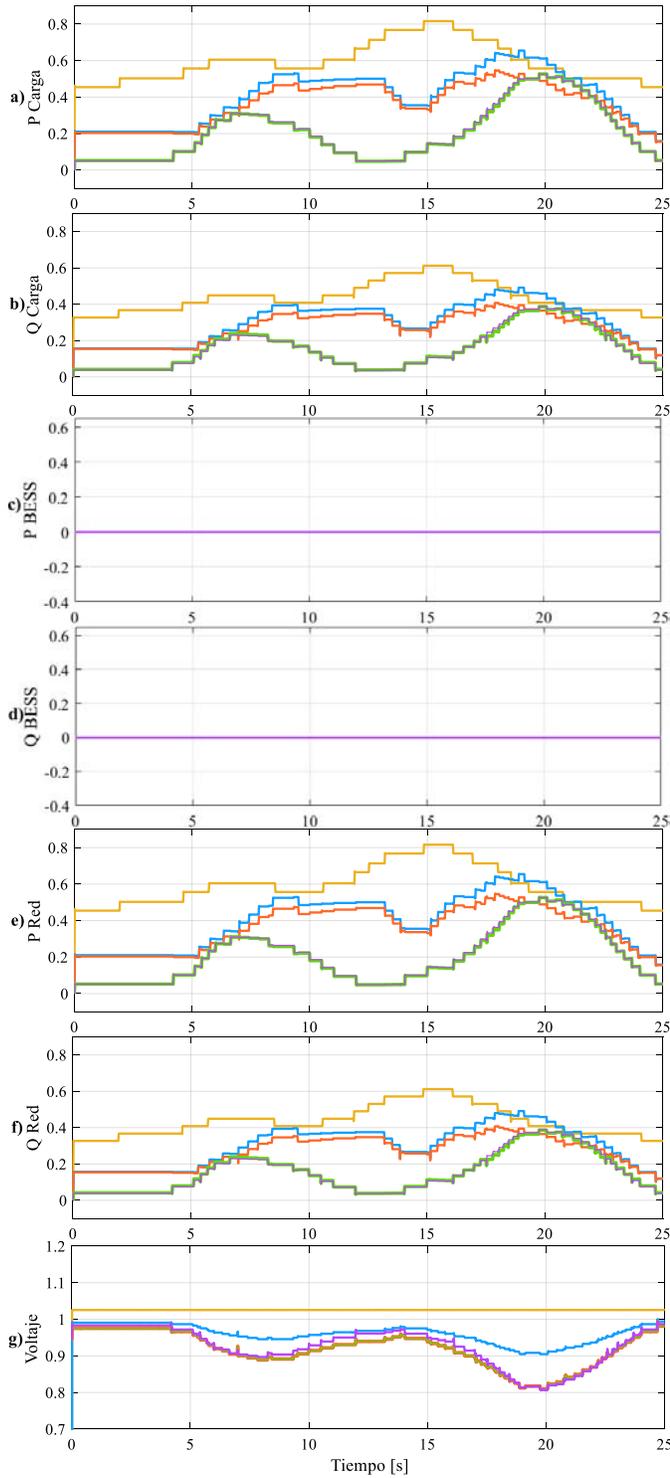


Fig. 4-9 Caso IV. Red sin BESS.

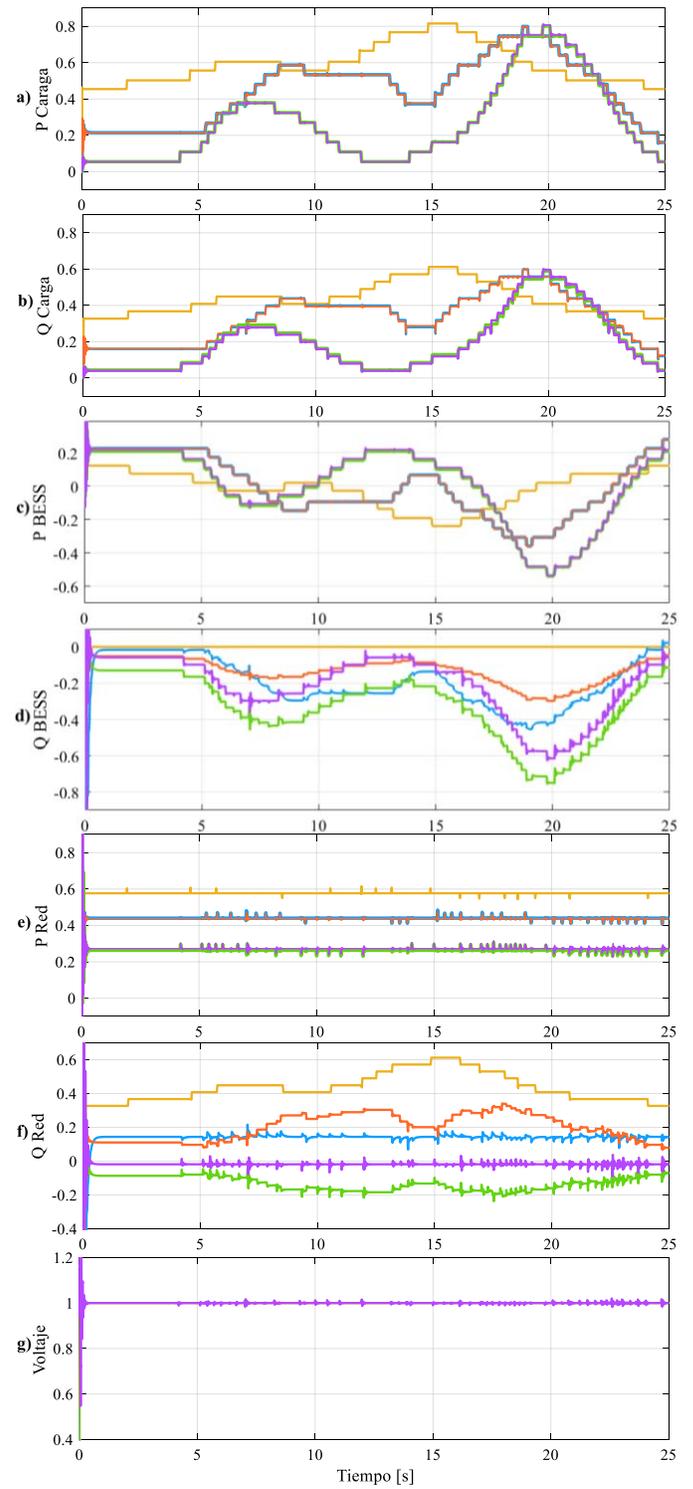


Fig. 4-10 Caso IV. Red con BESS.

4.7 Caso V. Operación en modo aislado

La operación en modo aislado se refiere a la capacidad de un sistema para operar de forma independiente a una red eléctrica, conservando la sincronía. Para que un sistema o una red pueda operar de esta forma, es necesario que posea tres elementos principales: fuentes, cargas y almacenamiento. En el caso de esta simulación, se utilizaron convertidores VSC para simular el comportamiento de un sistema fotovoltaico que inyecta potencia a la red de acuerdo a la curva de radiación solar que se muestra en **Fig. 4-11**. La inyección de esta potencia en la red puede genera sobretensiones en los nodos de conexión de los sistemas fotovoltaicos durante el periodo de mayor irradiancia. Para evitar estos desajustes en el voltaje, se optó por hacer la regulación de la tensión de manera simultánea con la operación en modo aislado. Los controles utilizados para la regulación de voltaje son los mismos que se implementaron en el tercer caso de estudio.

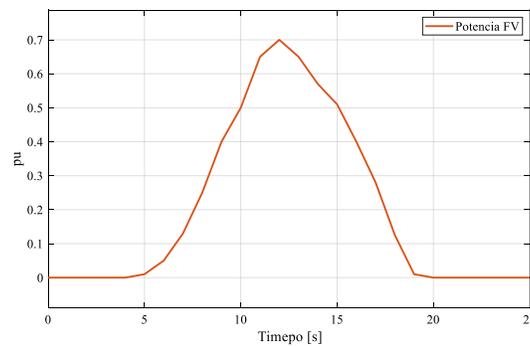


Fig. 4-11 Inyección de potencia FV

Para que el sistema opere en modo aislado, la demanda de potencia activa en la red debe llegar a cero, mientras que las diferentes cargas siguen siendo auto suministradas por los sistemas de generación fotovoltaicos. Si la generación los sistemas fotovoltaicos llega a ser mayor que la curva de demanda el exceso de potencia es almacenado por el BESS.

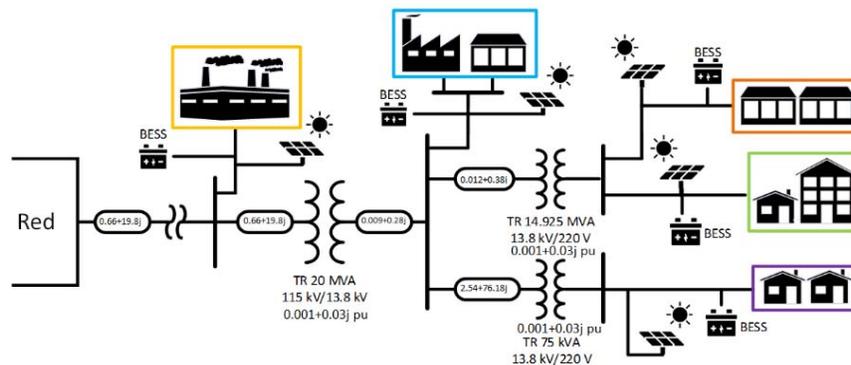


Fig. 4-12 Red de distribución con BESS y sistemas fotovoltaicos.

El esquema de la microrred utilizada para este caso de estudio es el que se muestra en la **Fig. 4-12**, y es el mismo que se utilizó para los casos anteriores. La diferencia radica en los sistemas fotovoltaicos añadidos para la operación en modo aislado.

En las gráficas a) y b) de la **Fig. 4-14** se puede observar el comportamiento de la potencia activa y reactiva de la carga, respectivamente.

Para que la potencia activa llegue a cero, es necesario que el sistema fotovoltaico suministre mayor potencia que la demanda de la carga durante el periodo de radiación solar. Una vez que llega a cero, el excedente de potencia es almacenado por el BESS como se observa en la gráfica c) de **Fig. 4-14**.

La potencia activa del sistema, vista desde la red, se observa en la gráfica e) de la **Fig. 4-14**. Cuando las potencias llegan y se mantienen en cero se dice que el sistema está operando en modo aislado. Como se observa, en los diferentes nodos de la red, la operación en modo aislado tiene diferentes tiempos, debido a las combinaciones entre las curvas de demanda y generación solar.

Finalmente, en la gráfica g) podemos observar las caídas de tensión que se mantienen constantes ya que no se modificó la potencia reactiva y la potencia activa solo se hizo variar un poco.

Específicamente para este caso de estudio, la potencia almacenada por el BESS no es devuelta a la red o a las cargas ya que es una consideración de operación propia de un control jerárquico de microrredes para determinar el mejor momento costo/beneficio en el que se debe suministrar la potencia almacenada. Algunas de las posibles aplicaciones de la energía almacenada en los BESS pueden ser:

- Reducir el pico a la demanda.
- Aumentar el tiempo de operación en modo aislado.
- Amortiguar el precio de consumo cuando las tarifas eléctricas se incrementen.

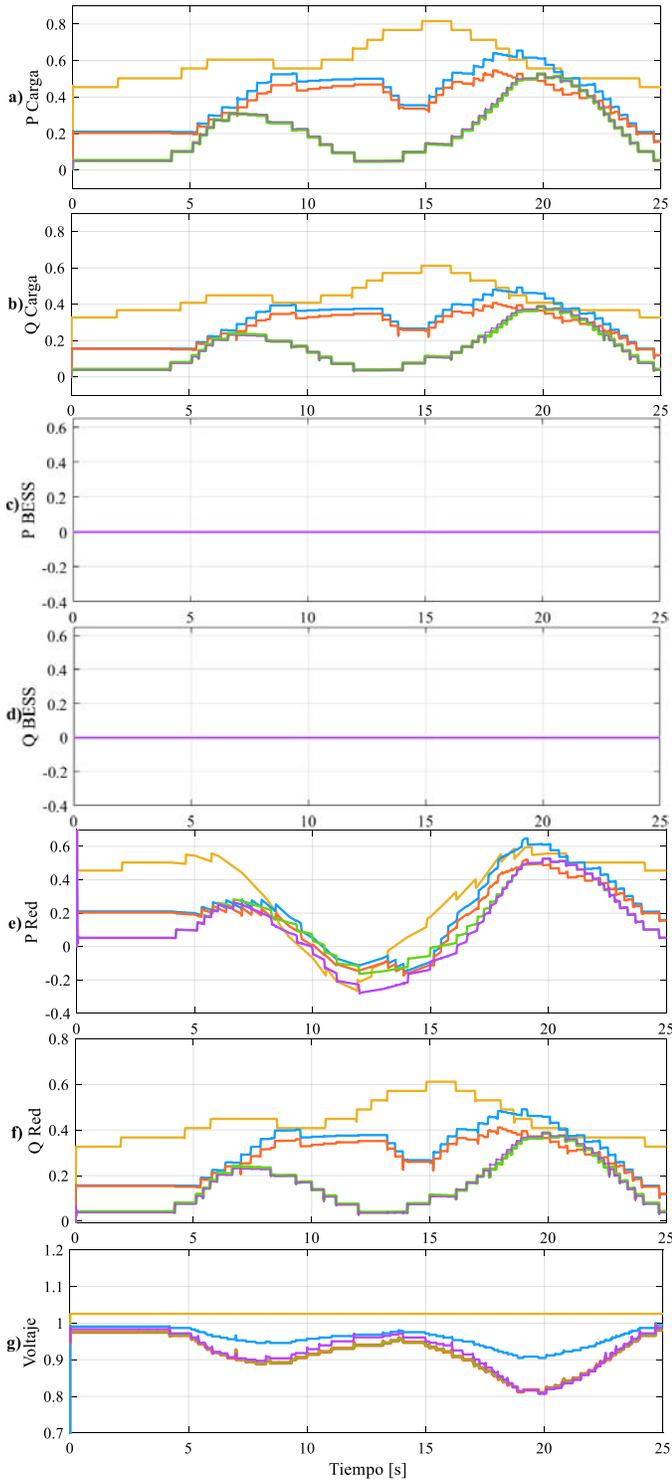


Fig. 4-13 Caso V. Red sin BESS.

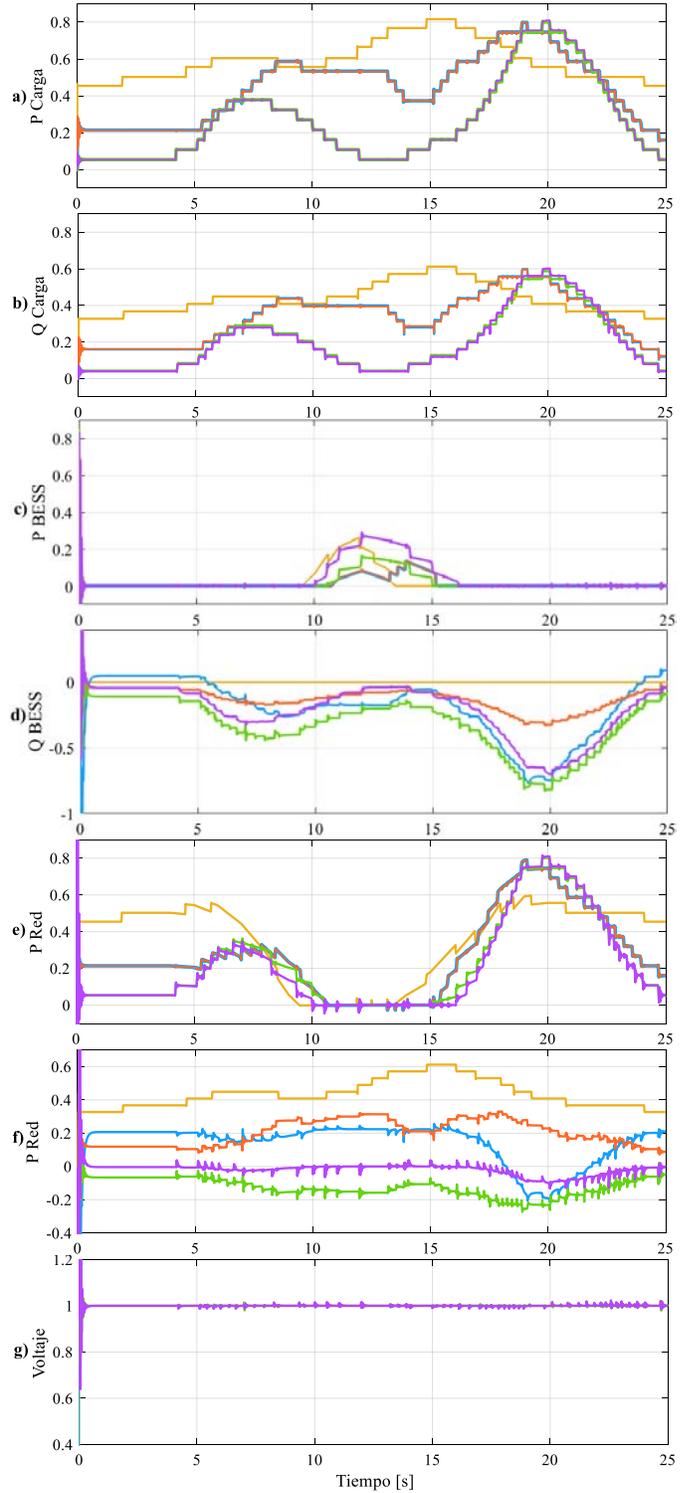


Fig. 4-14 Caso V. Red con BESS.

4.8 Conclusiones particulares

Con la integración de ambos convertidores de electrónica de potencia, el DAB y el VSC, dentro de un mismo esquema de operación BESS, se logró obtener un sistema funcional con las características adecuadas para permitir el flujo bidireccional de potencia y su control. La implementación de este sistema dentro la microrred de la Fig. 4-1 resultó en efectos favorables para ésta, ayudando a mejorar la estabilidad de sus voltajes y suavizando la demanda de potencia de sus cargas, como se demostró en este capítulo.

Todos los casos de estudio propuestos resultaron exitosos ya que las simulaciones realizadas arrojaron resultados positivos en cuanto al comportamiento esperado del sistema, como se pudo observar en las figuras correspondientes a cada caso. Las funciones del BESS que impactaron a la microrred de forma positiva no se limitan solo a las siguientes:

Se redujo con éxito el pico de demanda en todas las curvas de demanda de potencia características de cada carga implementada en la red propuesta de acuerdo a lo que se analizó en el primer caso de estudio.

Se corrigió el factor de potencia de forma que se redujeron las pérdidas de potencia reactiva inherentes a las impedancias de la microrred como se puede observar en el segundo caso de estudio.

Con el tercer caso de estudio se demostró la capacidad del BESS para regular la tensión del nodo al que se conecte, haciendo una compensación de reactivos como se observó en el tercer caso de estudio.

En el cuarto caso de estudio se logró combinar dos funciones operativas del BESS, brindando una operación ideal para la red.

En el último caso de estudio se analizó la operación en modo aislado, la cual funcionó de manera correcta, pese a que se tuvo que implementar una regulación de voltaje por la variación del perfil al inyectar potencia con los sistemas fotovoltaicos.

Con los resultados obtenidos de las simulaciones presentadas anteriormente se puede decir que el sistema BESS, diseñado y modelado en este trabajo de tesis, es funcional y puede pasar a una etapa de desarrollo de prototipo para corroborar experimentalmente los resultados, así como se muestra en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 5

DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

El experimento desarrollado en este capítulo consiste en la implementación de los prototipos del DAB y del VSC. En el esquema de operación presentado, el BESS opera como fuente suministradora de potencia, es decir, solamente inyecta potencia a la red. El propósito del experimento es dar un sustento práctico-experimental a los resultados obtenidos de las simulaciones mostradas en el Capítulo 3.

Los prototipos del DAB y del VSC desarrollados en [60] y [61], respectivamente, están compuestos por los módulos “*CREE High Performance MOSFET and Diode Evaluation Kit*”, que son medios puentes-H, los cuales se utilizan para realizar las conmutaciones. Los prototipos también cuentan con otro elemento esencial. Se trata del microcontrolador de Texas Instruments C200, que es una DSP utilizada para controlar las conmutaciones de los MOSFETs del convertidor.



Fig. 5-1 CREE Kit.

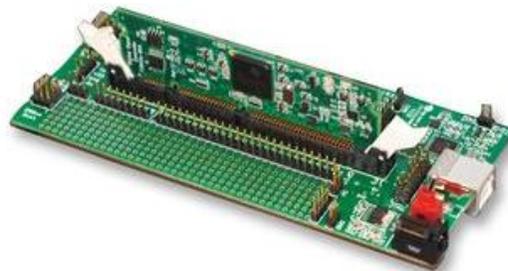


Fig. 5-2 TI c2000.

5.1 Prototipo del DAB

Para la primera parte del experimento, se puso en operación de forma independiente al convertidor DAB, de modo que permitiera el flujo de potencia desde una fuente de alimentación de 12 V, hasta una carga resistiva de 90 Ω aproximadamente, elevando el nivel de tensión de 12 V a 30 V de CD. La **Fig. 5-1** muestra el comportamiento de los diferentes voltajes y corrientes en el DAB durante su operación.

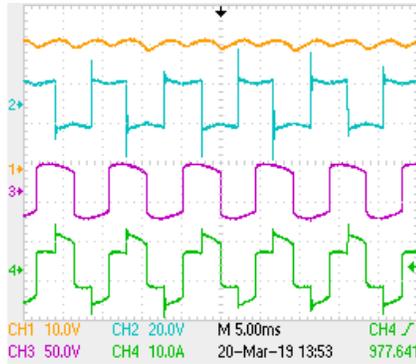


Fig. 5-3 Voltajes en el DAB.

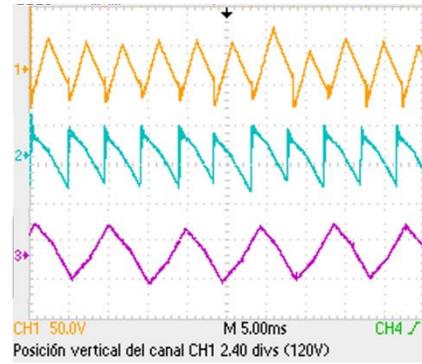


Fig. 5-4 Corrientes en el DAB.

En la **Fig. 5-3** se pueden observar las señales de voltaje en el convertidor DAB que representan lo siguiente:

La señal 1 de la **Fig. 5-3** es el voltaje a la salida del DAB, el cual tiene un rizo de voltaje debido a la conexión de un capacitor en paralelo a la carga para mejorar la forma de la señal.

La señal 2 de la **Fig. 5-3** muestra el comportamiento del voltaje VH1 en el primer puente-H, el cual tiene una forma cuadrada debido a que el puente operó con un ancho de pulso del 50%. De igual forma, el voltaje VH2 en el segundo puente-H se puede observar en la señal 3 de la **Fig. 5-3**, que también tiene una forma cuadrada ya que de igual forma operó con un ancho de pulso del 50%.

La última señal de la **Fig. 5-3** es el voltaje en el transformador que proviene de la diferencia entre VH1 y VH2.

En la **Fig. 5-4** se puede observar el comportamiento de las corrientes durante la operación del DAB.

El comportamiento de la corriente a la entrada del DAB se puede observar en la señal 1 de la **Fig. 5-4**. La forma de la señal se debe a la modulación SPSC utilizada, de acuerdo a lo que se puede observar en la **Fig. 3-5**.

En la señal 2 de la **Fig. 5-4** se muestra el comportamiento de la corriente a la salida del DAB, la cual posee una forma similar a la corriente de entrada, la diferencia es que está invertida.

La señal 3 de la **Fig. 5-4** es la corriente que circula por el transformador, la cual debería tener la forma trapezoidal característica, pero dado que los voltajes en las terminales del DAB son diferentes, la forma varía.

Los resultados del comportamiento del DAB obtenidos con este experimento fueron los esperados de acuerdo con lo que se describe en el Capítulo 3 sobre el modelo matemático del DAB. Con el prototipo del DAB se logró incrementar el nivel de tensión de CD de 12 V suministrados por la fuente de alimentación, a un nivel de 30 V aproximadamente, además de que se permitió el flujo de potencia de la fuente a la carga.

5.1 Prototipo del VSC

En la segunda parte del experimento se probó la capacidad del VSC para operar como inversor y permitir el flujo de potencia desde una fuente de alimentación hasta una carga resistiva, en este caso trifásica con un filtro de segundo orden para mejorar las formas de onda del voltaje. En la **Fig. 5-2** se observa el comportamiento de las variables del VSC durante su operación.

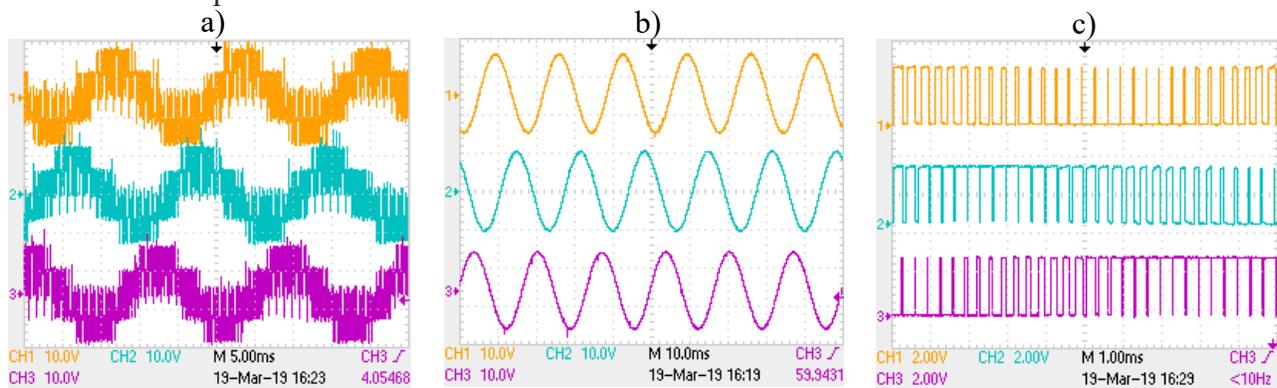


Fig. 5-5 Curvas características del prototipo del VSC.

a) Voltajes trifásico después del filtro, b) voltajes trifásicos antes del filtro, c) señales moduladoras.

El esquema del filtro de segundo orden implementado a la carga para mejorar las formas de onda de las señales de salida se muestra en la **Fig. 5-6**.

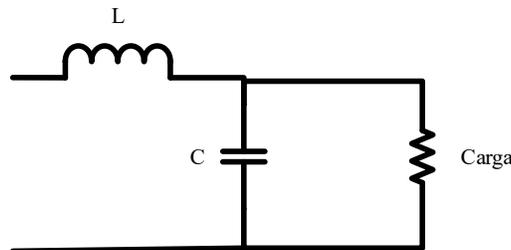


Fig. 5-6 Filtro de segundo orden.

En la gráfica a) de la **Fig. 5-5** se observan los voltajes trifásicos generados por el VSC a partir de los 10 V suministrados a la entrada del convertidor. Cabe destacar que los voltajes fueron medidos antes del filtro por que poseen esa forma de onda. Las señales están desfasadas 120° entre sí.

En la gráfica b) de la **Fig. 5-5** se observan las mismas señales de voltaje mostradas en a), pero después de haber sido filtradas. Estas señales conservan sus desplazamientos de fase y poseen un voltaje pico de 10 V.

Finalmente, en la gráfica c) de la **Fig. 5-5** se pueden observar las señales de control para los tres medios puentes-H que compone al VSC. Estas señales utilizan una modulación PWM para poder generar las señales senoidales que se muestran en la gráfica b).

El comportamiento del prototipo del VSC fue el esperado, las señales de voltaje trifásico obtenidas a la salida del VSC fueron bastante limpias, por lo que su operación como inversor resultó óptima. También permitió el flujo de potencia desde la fuente de alimentación hasta la carga trifásica, por lo que este convertidor funcionó adecuadamente.

5.3 Prototipo del BESS

Una vez que ambos convertidores fueron probados exitosamente, se prosiguió a unirlos con una batería de auto, marca “América” de 12 volts, para formar la topología del BESS propuesta en esta tesis. Se conectó el puerto de CD de 30 V del DAB al puerto de CD del VSC con un arreglo de capacitor y resistencia en derivación para regular la tensión en ese puerto.

Los circuitos de control de cada convertidor fueron energizados de forma independiente a través de dos fuentes de alimentación. De igual forma, cada convertidor utilizó su propia DSP para implementar el esquema de control respectivo.

La carga que se conectó al BESS fue la misma que se utilizó para probar el funcionamiento del convertidor VSC, una carga resistiva trifásica con un filtro LC para limpiar las formas de onda.

La distribución de los convertidores de electrónica de potencia y los dispositivos de medición utilizados para observar el comportamiento del sistema se muestra en la **Fig. 5-6**.



Fig. 5-7 Prototipo del BESS.

Es importante recalcar que el esquema de operación del BESS propuesto en este experimento es la implementación del sistema como fuente suministradora de potencia, por lo que no existe una conexión con la red que inyecte potencia al BESS ya que el sistema requeriría de las modificaciones planteadas en Trabajos Futuros, y el objetivo del experimento es solo demostrar la capacidad del sistema para suministrar potencia de una batería a una carga. Los resultados obtenidos del experimento se observan en la **Fig. 5-8** y la **Fig. 5-9**.

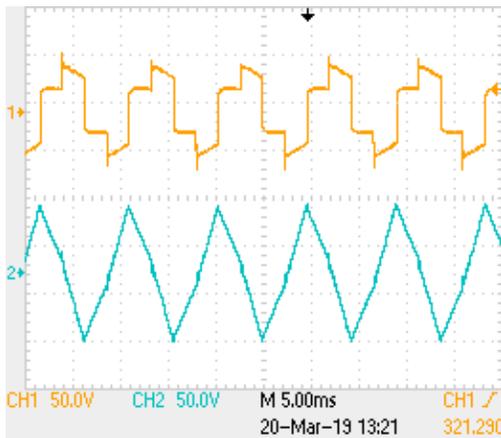


Fig. 5-8 Variables del DAB en el BESS.

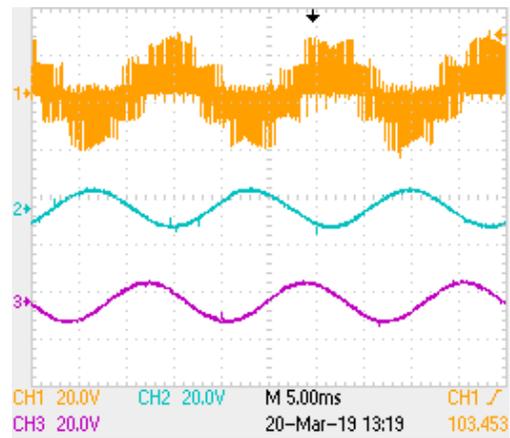


Fig. 5-9 Voltajes del VSC en el BESS.

La señal 1 de la **Fig. 5-8** muestra el comportamiento del voltaje en la inductancia parásita del DAB, el cual es prácticamente igual al que se observa en la **Fig. 5-3** durante la prueba en individual de este convertidor. Lo mismo ocurre para la señal 2 de la **Fig. 5-8** que

representa la corriente que fluye por la inductancia, la cual tiene la misma forma que la señal 3 de la **Fig. 5-4**. Esto se debe a que se utilizaron los mismos parámetros de operación del DAB para ambos experimentos, el voltaje CD de 12 V a la entrada del convertidor y el desplazamiento de fase de $-\pi/2$ en el segundo puente-H.

En la **Fig. 5-9** se pueden observar las señales 1, 2 y 3 que corresponden a los voltajes trifásicos de la fase a, b y c respectivamente. El voltaje de la fase a fue medido antes del filtro, mientras que los voltajes de las fases b y c se midieron después del filtro.

Con el experimento realizado en este capítulo se demostró la capacidad del BESS, formado por los convertidores DAB y VSC, para elevar un voltaje de CD y suministrar un voltaje trifásico, así como también permitir el flujo de potencia desde la batería hasta la carga. Los resultados obtenidos coinciden con las simulaciones realizadas en el Capítulo 3, proporcionando el sustento práctico-experimental buscado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 Aportes

Los aportes realizados con el desarrollo de este trabajo de tesis a la Facultad de Ingeniería de la UNAM y al área de la electrónica de potencia se enlistan a continuación.

- Desarrollo de los modelos conmutados y promediados de un sistema de almacenamiento BESS haciendo uso de las topologías VSC y DAB en plataforma Matlab Simulink.
- Desarrollo de los esquemas de control de potencia y control de voltaje para el convertidor DAB y el convertidor VSC, respectivamente.
- Demostración de las capacidades del modelo BESS obtenido en una microrred bajo los siguientes casos de estudio: i) reducción del pico de la demanda, ii) regulación de voltaje, iii) corrección del factor de potencia y iv) funcionamiento en modo aislado y casos mixtos.
- Participación en el congreso CINERGIA UG 2018 y V Escuela de Verano de Potencia con el artículo “Diseño y modelo de un sistema de almacenamiento de energía basado en la topología DAB-VSC” en modalidad poster.
- Desarrollo del experimento basado en el sistema BESS propuesto, haciendo uso los prototipos de los convertidores de electrónica de potencia, DAB y VSC, diseñados y desarrollados en la Facultad de Ingeniería, UNAM.

6.2 Trabajos futuros

a) Implementación de técnicas de modulación más eficientes

El tipo de modulación que se implemente en un convertidor está directamente relacionado con la eficiencia y las pérdidas del convertidor. En cualquier condición de operación, la presencia de cualquier cantidad de corriente reactiva reduce la cantidad de corriente activa, de tal forma que mientras mayor sea la corriente reactiva la eficiencia será menor [62]. Para el caso del convertidor DAB, la presencia de corriente reactiva en el circuito de CA implica la disminución de corriente CD entregada por el dispositivo. Reducir la corriente reactiva hasta cero no solo incrementaría la eficiencia de los convertidores, también traería otras ventajas como: i) reducción del estrés en los interruptores de potencia ii) reducción del tamaño del capacitor.

Técnicas como la modulación por Conmutación Suave (ZVS), que ayuda a mejorar la eficiencia del convertidor, o la técnica de Modulación por Valores Proporcionales (PVM), para reducir la corriente reactiva, pueden ser implementadas en el convertidor DAB para mejorar su desempeño.

b) Análisis de nuevos casos de estudio

Las ventajas operativas que aporta el sistema BESS a una microrred no solo se limitan a las analizadas en los casos de estudio propuestos en el Capítulo 4. La flexibilidad del sistema BESS permite brindar una amplia gama de operaciones, que se enlistan a continuación, las cuales valen la pena ser analizadas e implementadas debido a las ventajas que aportan a las redes eléctricas.

- Eliminación de armónicos.
- Amortiguamiento y optimización de precios.
- Control carga-frecuencia.
- Balanceo de cargas.

- Eliminación de inercia.
- Soporte de estabilidad de voltaje.
- Optimización de renovables.

c) Mejora del experimento

El experimento que se realizó en el Capítulo 5 fue una prueba en lazo abierto de la capacidad del sistema BESS para suministrar potencia a una carga, que sirvió para analizar las variables características de los convertidores en cuestión. Para realizar un experimento más completo que abarque todas las características del BESS de forma integral y que permita el flujo bidireccional de potencia, es necesario mejorar los prototipos de los convertidores implementando los respectivos controles y elementos de medición para que el sistema trabaje en lazo cerrado.

Un elemento clave para la operación en conjunto del BESS con la red es el PLL. Con la implementación de este elemento en el prototipo se podrá sincronizar el voltaje trifásico en las terminales de CA del VSC con el voltaje de la red de tal forma que se puedan interconectar. Así el sistema podrá recibir energía desde la red, almacenándola en la batería, cumpliendo con las funciones de un sistema de almacenamiento.

d) Cumplir con estándares y normas propios de los sistemas de almacenamiento

Procurar el desarrollo del sistema dentro los códigos y estándares que se proponen para medir el funcionamiento, asegurar la salud y seguridad en el despliegue nuevos sistemas de almacenamiento, así como las comunicaciones y protocolos de control necesarios para la integración en los sistemas de almacenamiento de acuerdo con lo que propone la CRE, CENACE y el INEEL en [63].

e) Operación “hardware in the loop”

Realizar la simulación en tiempo real de los modelos de convertidor, batería y red, operando en conjunto con el modelo de prototipo construido en laboratorio a fin de comprobar la operación dinámica de la red propuesta en la **Fig. 4-1**.

f) Incorporar un sistema de control jerárquico en microrredes

Al implementar un control jerárquico de cuatro niveles sobre cada convertidor y en la microrred en general se espera garantizar el funcionamiento óptimo en conjunto de los dispositivos de almacenamiento de energía.

g) Utilizar valores reales para la simulación de la microrred

Considerar valores de impedancias reales de una microrred para el desarrollo de los casos de estudio de forma que los resultados se aproximen más a un caso real.

6.3 Discusión

Durante el desarrollo del experimento, evaluado en el Capítulo 5, se presentaron un par de inconvenientes que afectaron la correcta operación del sistema BESS y que se presentan a continuación.

Dentro de la topología del DAB existe un transformador de alta frecuencia que se encarga de elevar el nivel de tensión entre las terminales de CD y de brindar un aislamiento entre los mismos puertos. La ventaja directa de trabajar con altas frecuencias para realizar las conmutaciones de los interruptores que conforman al DAB es el tamaño del transformador. Mientras mayor sea la frecuencia de conmutación el tamaño del transformador será menor y su densidad de potencia será mayor. Por desgracia, no se contaba con este elemento de gran importancia ya que se requiere de un diseño particular para su aplicación, de tal forma que se utilizó un transformador convencional de 60 Hz, lo cual afectó la funcionalidad del prototipo. Además de esto se presentó un inconveniente ajeno al prototipo con las señales de

control generadas por el DSP, las cuales se desestabilizaban a frecuencias de operación mayores a los 100 Hz.

6.4 Conclusiones

Con el rumbo actual del crecimiento de la demanda energética, aunado a los problemas ambientales cada vez más severos, resulta imperativo el desarrollo e implementación de tecnologías que brinden soluciones eficientes a las problemáticas de la red y del ambiente. Dentro de las diferentes propuestas que existen para atacar estos problemas, el almacenamiento energético sobresale de las demás por la importancia de las ventajas operativas que aporta a las redes eléctricas.

Sin embargo, aún no existe una única tecnología que sea capaz de satisfacer todos los requerimientos de almacenamiento de la red actual, por lo que es necesario el desarrollo de sistemas de alto grado de eficiencia, que puedan cargarse y descargarse con frecuencia, que no alteren los parámetros de la red y que sean de bajo costo. En este contexto, el concepto de almacenamiento de energía con baterías es un tema que resulta de gran interés para la ingeniería eléctrica, y en general para la comunidad científica, el cual se ha sido estudiado y desarrollado durante las últimas décadas englobando tópicos de optimización de energías renovables, estrategias de balance y estabilidad en las redes eléctricas, desarrollo de microrredes y redes eléctricas inteligentes, entre otros.

En esta tesis de Ingeniería Eléctrica se presentó un nuevo modelo de BESS basado en la topología de los convertidores de electrónica de potencia DAB y VSC, los cuales se encargan del control de la potencia y el control del voltaje respectivamente, permitiendo utilizar técnicas de modulación más eficientes en cada convertidor reduciendo las pérdidas en los semiconductores y aumentando la eficiencia en general. Este sistema presenta una serie de ventajas de alto grado de importancia para la red eléctrica actual, por lo cual es importante favorecer e impulsar el desarrollo de investigaciones como esta de modo que se acelere la conversión de las redes eléctricas convencionales a redes inteligentes.

Finalmente, se espera que los aportes realizados por este trabajo de tesis sirvan para impulsar el desarrollo y la investigación del sistema BESS con topología DAB-VSC de modo

que el sistema pueda llegar a forma parte de la solución a los problemas de las redes eléctricas actuales, así como a impulsar el desarrollo de la red eléctrica inteligente.

Referencias

- [1] G. Delille, B. Francois, G. Malarange, and J.-L. Fraisse, "Energy storage systems in distribution grids: New assets to upgrade distribution network abilities," in Proc. 20th Int. Conf. Exhib. Elect. Distrib., I, Prague, Czech Republic, Jun. 2009, pp. 1–4.
- [2] A. Hanif, Y. Yu, D. Devoto and F. H. Khan, "A Comprehensive Review toward the State-of-the-Art in Failure and Lifetime Predictions of Power Electronic Devices," in *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- [3] Confronting the Duck Curve: How to Address Over-Generation of Solar Energy. (October 12, 2017). Office of Energy & Renewable Energy. <http://www.energy.gov/eere/articles/confronting-duck-curve-how-address-over-generation-solar-energy>.
- [4] St. John (February 10, 2014). GTM: A Wood Mackenzie Business. <https://www.greentechmedia.com/articles/read7hawaiiis-solar-grid-landscape-and-the-nessie-curve#gsgc0Y1aE>
- [5] The German 50.2 Hz problem. Knowing power contribution from PV systems and how to manage risk through system testing on top of component testing. DNV. GL. <https://www.dnvgl.com/cases/the-german-50-2hz-problem-80862>
- [6] M. T. Lawder et al., "Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications," in Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014. doi: 10.1109/JPROC.2014.2317451
- [7] Du, P., Lu, N.: 'Energy storage for smart grids: planning and operation for renewable and variable energy resources (VERs)' (Academic Press, 2014)
- [8] Nguyen, T.D., Tseng, K.J., Zhang, S., et al.: 'A novel axial flux permanent magnet machine for flywheel energy storage system: design and analysis', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011, 58, (9), pp. 3784–3794
- [9] Deane, J.P., McKeogh, E.J., Gallachoir, B.P.O.: 'Derivation of intertemporal targets for large pumped hydro energy storage with stochastic optimization', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2013, 28, (3), pp. 2147–2155
- [10] Le, H.T., Santoso, S.: 'Operating compressed-air energy storage as Dynamic reactive compensator for stabilising wind farms under grid fault conditions', *IET Renew. Power Gener.*, 2013, 7, (6), pp. 717–726
- [11] Tiago Davi Curi Busarello, Ali Mortezaei, Abdullah S. Bubshait, Marcelo Godoy Simões, 2017, Three-phase battery storage system with transformerless cascaded multilevel inverter for distribution grid applications, *IET Renewable Power Generation*.
- [12] Mostafa Farrokhhabadi, Bharatkumar V. Solanki, Claudio A. Cañizares, Kankar Bhattacharya, Sebastian König, Patrick S. Sauter, Thomas Leibfried, and Sören Hohmann, (2017), Energy Storage in Microgrids: Compensating for Generation and Demand Fluctuations While Providing Ancillary Services, in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, no. 5, pp. 81-91, Sept.-Oct. 2017.
- [13] Robert A. Huggins, "Energy Storage", New York: Springer, 2010.
- [14] T. Zhao and Z. Ding, "Cooperative Optimal Control of Battery Energy Storage System Under Wind Uncertainties in a Microgrid," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 2, pp. 2292-2300, March 2018.

- [15] The BESS way forward Stuart Grattage, Head of Engineering for ABB Power Systems in the UK, explains how battery energy storage systems (BESS) can help keep the grid in balance. ABB. <http://www.abb.com/cawp/seitp202/84694022ccf43aae44257c43004c0be8.aspx>.
- [16] Delivering Security for Victoria's Energy Network. Ballarat Energy Storage System. Spotless. <https://www.spotless.com/bess/>.
- [17] Ahmed Ali. Energy Storage systems are the set of methods and technologies used to store electricity. <https://www.studentenergy.org/topics/energy-storage>.
- [18] S. Chowdhury and T. Matlokotsi, "Optimal placement and sizing of renewable distributed energy in electricity networks considering different load models", 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion, 2017, pp. 1-6.
- [19] A. Emadi, Y. J. Lee and K. Rajashekara, "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2237-2245, June 2008. doi: 10.1109/TIE.2008.922768
- [20] S. Cole and R. Belmans, "A proposal for standard VSC HVDC dynamic models in power system stability studies," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 967-973, aprm2011.
- [21] Mircea Eremia; Chen-Ching Liu; Abdel-Aty Edris, "FACTS Technologies," in *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*. IEEE, 2016, pp. doi: 10.1002/9781119175391.part2
- [22] Sheng Xiaoguang, Tongzhen Wei and Qunhai Huo, "Optimal configuration of multi-DFACTS joint operation in distributed network," 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, 2014, pp. 1-5. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941062
- [23] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, (2010), *Electronic Power Conversion, Voltage-Source Converters in Power Systems: Modeling, Control and Applications*, in *IEEE PRESS, WILEY*.
- [24] P. Valtonen, G. Mendes and S. Honkapuro, "Demand response for increased grid flexibility: The case of Finland," 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), Auckland, 2017, pp. 1-6.
- [25] Aggarwal, S. & Orvis, R. (2016). *Grid Flexibility: Methods for Modernizing the Power Grid*. Energy Innovation.
- [26] Goran Strbac, Marko Aunedi, Ioannis Konstantelos, Roberto Moreira, Fei Teng, Rodrigo Moreno, Danny Pudjianto, Adriana Laguna, and Panagiotis Papadopoulos, "Opportunities for energy storage, assessing whole-system economic benefits of energy storage in future electricity systems", in *IEEE power & energy magazine*, 10.1109/MPE.2017.2708858.
- [27] T. Zhao and Z. Ding, "Cooperative Optimal Control of Battery Energy Storage System Under Wind Uncertainties in a Microgrid," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 2292-2300, March.
- [28] Guillermo Javier Martín Chicharro, José Miguel Ruiz González, "Sistemas de Almacenamiento de Energía", Universidad de Valladolid.
- [29] F. Diaz-Gonzales, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafafila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," *Renew. Sustainable Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2154–2171, May 2012.
- [30] Almacenamiento de energía a media y gran escala, guía sobre el sector del almacenamiento de energía a media y gran escala. (Febrero, 2017). Twenergy. [tps://twenergy.com/guias-eficiencia-energetica/guia-sobre-el-sector-del-almacenamiento-de-energia-a-media-y-gran-escala](https://twenergy.com/guias-eficiencia-energetica/guia-sobre-el-sector-del-almacenamiento-de-energia-a-media-y-gran-escala).
- [31] Daniel W. Hart, "Power Electronics," New York: McGraw-Hill, 2011.
- [32] G. Wang et al., "A Review of Power Electronics for Grid Connection of Utility-Scale Battery Energy Storage Systems," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1778-1790, Oct. 2016.

- [33] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, Dec. 2010.
- [34] S. M. Venkit and P. C. Athira, "Solar powered ZCS bidirectional buck-boost converter used in battery energy storage systems," 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Nagercoil, 2016, pp. 1-5.
- [35] C. J. Solis and G. A. Rincón-Mora, "87%-Efficient 330-mW 0.6- μ m Single-Inductor Triple-Output Buck–Boost Power Supply," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 8, pp. 6837-6844, Aug. 2018.
- [36] L. Maharjan, S. Inoue, H. Akagi, and J. Asakura, "State-of-charge (SOC)-balancing control of a battery energy storage system based on a cascade pwm converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 1628–1636, Jun. 2009
- [37] J. I. Y. Ota, T. Sato, and H. Akagi, "Enhancement of performance, availability, and flexibility of a battery energy storage system based on a modular multilevel cascaded converter (MMCC-SSBC)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 2791–2799, Apr. 2016.
- [38] Xiaosong Hu, Changfu Zou, Caiping Zhang, Yang Li, "Technological Developments in Batteries," 2017 *IEEE power and energy magazine*, 1540-7977/17©2017IEEE.
- [39] A. Rodríguez, A. Vázquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando and J. Sebastián, "Different Purpose Design Strategies and Techniques to Improve the Performance of a Dual Active Bridge With Phase-Shift Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 790-804, Feb. 2015.
- [40] G. Oggier, G. O. García and A. R. Oliva, "Modulation strategy to operate the dual active bridge DC-DC converter under soft switching in the whole operating range," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1228-1236, April 2011.
- [41] A. Rodríguez Alonso, J. Sebastian, D. G. Lamar, M. M. Hernando and A. Vazquez, "An overall study of a Dual Active Bridge for bidirectional DC/DC conversion," 2010 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, 2010, pp. 1129-1135.
- [42] Juan Ramón Rodríguez Rodríguez, Edgar L. Moreno-Goytia, Vicente Venegas-Rebollar, Luis E. Ugalde-Caballero, G.A. Anaya-Ruiz, "The Proportional-Values Modulation (PVM), a technique for improving efficiency and power density of bidirectional DAB converters", Ingeniería Eléctrica, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, México.
- [43] Biao Zhao, Qiang Song, Wenhua Liu, Yandong Sun, Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC–DC converter for high-frequency-link power-conversion system, *IEEE Trans. Power Electron.* 8(29) (2014) 4091–4106.
- [44] I. Syed and W. Xiao, "Modeling and control of DAB applied in a PV based DC microgrid," 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Bengaluru, 2012, pp. 1-6.
- [45] Wenze Liu; Zexiang Cai, "Model analysis and robust control design of VSC-HVDC converter with dq0 axis," Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on , vol., no., pp.1792,1796, 6-9 April 2008
- [46] Nikkhajoei, H.; Iravani, R., "Dynamic Model and Control of AC–DC–AC Voltage-Sourced Converter System for Distributed Resources," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.22, no.2, pp.1169,1178, April 2007
- [47] Jieqiu Bao; Zhenguo Gao; Li Yu; Chuiyi Meng, "Research on dynamic model and decoupling control strategy of VSC-HVDC system," *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on* , vol., no., pp.1,4, 20-23 Aug. 2011
- [48] Lidong Zhang; Harnefors, Lennart; Nee, H.-P., "Modeling and Control of VSC-HVDC Links Connected to Island Systems," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.26, no.2, pp.783,793, May 2011

- [49] Beerten, J.; Cole, S.; Belmans, R., "Modeling of Multi-Terminal VSC HVDC Systems With Distributed DC Voltage Control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.29, no.1, pp.34,42, Jan. 2014
- [50] Chaudhary, S.K.; Teodorescu, R.; Rodriguez, P.; Kjaer, P.C.; Gole, A.M., "Negative Sequence Current Control in Wind Power Plants With VSC-HVDC Connection," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol.3, no.3, pp.535,544, July 2012
- [51] Lie Xu; Andersen, B.R.; Cartwright, P., "VSC transmission operating under unbalanced AC conditions - analysis and control design," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.20, no.1, pp.427,434, Jan 2005
- [52] Wenyuan Wang; Barnes, M., "Power Flow Algorithms for Multi-Terminal VSC-HVDC With Droop Control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.29, no.4, pp.1721,1730, July 2014
- [53] Yan Liu; Zhe Chen, "A Flexible Power Control Method of VSC-HVDC Link for the Enhancement of Effective Short-Circuit Ratio in a Hybrid Multi-Infeed HVDC System," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.28, no.2, pp.1568,1581, May 2013
- [54] Davari, M.; Mohamed, Y.A.-R.I., "Robust Multi-Objective Control of VSC-Based DC-Voltage Power Port in Hybrid AC/DC Multi-Terminal Micro-Grids," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol.4, no.3, pp.1597,1612, Sept. 2013
- [55] Dan T. Ton and Merrill A. Smith, "The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative," The DOE Smart Grid R&D Program considers microgrids as a key building block for a Smart Grid and has established microgrid R&D as a key focus area. A significant number of R&D needs and challenges have been identified for microgrids during two workshops, with input from more than 170 experts and practitioners representing a broad group of stakeholders, Elsevier, *The Electric Journal*, 2012.
- [56] Dan T. Ton., *Microgrids, Smart Grid & Our Energy Future*. U.S. Green Building Council Maryland. 11 Mar. 2014.
- [57] Peter Asmus and Lawrence Mackinnon. *Research Report: Microgrids-Commercial/Industrial, Community/Utility, Campus/Institutional, Military, Remote, GridTied Utility Distribution, and Direct Current Microgrids: Global Market Analysis and Forecasts*, Navigant Research, 4Q 2013
- [58] *Grid-Integrated Microgrids Plenary Session*. EPRI, Palo Alto, CA: 2013.
- [59] *IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems*, IEEE Standard 1547.4, 2011.
- [60] Velázquez Ibáñez Alfredo, "Modelado e implementación a escala de un convertidor doble puente activo operando en lazo cerrado para múltiples aplicaciones", Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [61] Osorio Rodríguez Gabriel, "Modelado, simulación y construcción de un prototipo a escala reducida de un hidrogenerador impulsado por corrientes marinas", Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [62] 1459–2000—IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2000.
- [63] Reporte de prioridades nacionales sobre el tema: "Almacenamiento de energía en la red eléctrica", (marzo, 2018), CONACYT, <https://www.conacyt.gob.mx/index.php/sni/convocatorias-conacyt/convocatorias-fondos-sectoriales-constituidos/convocatoria-sener-conacyt-sustentabilidad-energetica/convocatorias-abiertas-sener-conacyt-sustentabilidad-energetica/conv-18-02-aepse/18643-rpnaere/file>.