

Evaluación del comportamiento de sistemas de almacenamiento por baterías bajo la influencia de fenómenos de calidad de la potencia en la red eléctrica

Autores

**Edwar Santiago Rodriguez Rodriguez
Daniel Alejandro Moya Díaz**

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electrónica
Fusagasugá, Colombia
2023

Evaluación del comportamiento de sistemas de almacenamiento por baterías bajo la influencia de fenómenos de calidad de la potencia en la red eléctrica

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de ingeniero electrónico

Autores

**Edwar Santiago Rodríguez Rodríguez
Daniel Alejandro Moya Díaz**

Director:

Andrés Felipe Guerrero Guerrero

Línea de investigación:

Aprendizaje, conocimiento, tecnologías, comunicación y digitalización.

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Fusagasugá, Colombia

2023

Dedicatoria Edwar Santiago Rodriguez

Dedico este proyecto de grado a la persona que me moldeó como individuo y como ser humano, alguien que generosamente me brindó su amor, su tiempo y su incansable esfuerzo para proporcionarme todo lo necesario. Mi formación como profesional ha sido un largo camino, gran parte de mi motivación proviene del deseo de que la persona que me dio la vida se sienta orgullosa de su hijo. Aunque ya no estés en esta vida terrenal, sé que siempre te llevaré en mis pensamientos y en mi corazón, tengo la certeza de que estarás a mi lado para apoyarme en cada circunstancia. Mi logro es un tributo a ti; te amo infinitamente, mamá.

Quiero dedicar este logro a las personas especiales en mi vida. A mi hermana, quien me ha acompañado a lo largo de toda mi vida, en los momentos de alegría y adversidad. A mi sobrina, mi pequeño motor, quien me motiva a seguir adelante. A mi tía Amparo, por brindarme su cariño y apoyo en momentos difíciles. A todas las personas que han cruzado mi camino para brindarme su ayuda, Luz Marina Osorio, Nelly Garzón, Naudis Forero y Yaneth Beltrán. Además, quiero agradecer a mis amigas incondicionales, amigos, compañeros, docentes y todas las personas que han sido parte de mi vida. Con el corazón lleno de gratitud, cierro este capítulo, mirando hacia adelante con grandes expectativas.

Dedicatoria Daniel Alejandro Moya

Dedico este trabajo a la persona que con amor, sacrificio e inquebrantable apoyo ha sido mi fortaleza a lo largo de este camino académico, por la cual siento un inmenso afecto y respeto: mi madre. A mi padre, quien, con su soporte, trabajo y devoción, logró formarme y por ello, me siento orgulloso. A mi hermano, quien me acompaña de la mano en los desafíos que nos pone la vida. A mi tía Ana, quien fue la responsable de fomentar el interés por el estudio y a quien recuerdo con mucho cariño. A mis abuelos, familia, amigos, compañeros y docentes que formaron parte de mi proceso de formación. A todas las personas que participaron en esta investigación, por su contribución y colaboración. Este logro es el resultado de un esfuerzo conjunto, les agradezco de todo corazón por haber formado parte de este viaje académico.

Agradecimientos

Nuestro proyecto de grado y formación académica no hubiera sido posible sin el apoyo y la contribución de innumerables personas que de una u otra manera, han desempeñado un papel fundamental en el éxito de este proceso. Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos aquellos que nos han brindado su guía, apoyo y conocimientos a lo largo de este recorrido académico. Sus aportes, ya sea en forma de consejos, tiempo dedicado o recursos compartidos, han sido esenciales para alcanzar nuestros objetivos.

Queremos expresar nuestro agradecimiento mutuo. Durante el proceso de desarrollo y culminación de nuestro proyecto, no solo aportamos con esfuerzo académico, sino que también compartimos experiencias y tiempo, fortaleciendo nuestros lazos de amistad. La dedicación, el compromiso y el trabajo en equipo han sido esenciales para nuestro éxito. Gracias a nuestra determinación compartida, hemos llegado hasta aquí y esperamos continuar alcanzando logros en el futuro.

Deseamos manifestar un agradecimiento especial al doctor Andrés Felipe Guerrero, nuestro director y guía en este proyecto de grado. Sus valiosos aportes, conocimientos, tiempo dedicado, dedicación y compromiso han sido fundamentales, no solo durante el desarrollo del proyecto, sino a lo largo de todo nuestro proceso de formación como ingenieros.

Agradecemos a nuestros compañeros y amigos de la universidad por haber sido parte fundamental de nuestro proceso de formación como profesionales. No solo compartimos una vida académica, sino que también compartimos vivencias, preocupaciones, responsabilidades y momentos de felicidad, fortaleciendo nuestro crecimiento como seres humanos. Estamos profundamente agradecidos por haber tenido la fortuna de recorrer este camino junto a ustedes.

Agradecemos profundamente a todos los docentes que fueron parte integral de este proceso. A través de sus diversas áreas de conocimiento, nos brindaron la oportunidad de enriquecer nuestra formación y desarrollar competencias adicionales. Expresamos nuestro agradecimiento a todas las personas que, a pesar de no estar directamente involucradas en nuestro proceso de formación, nos brindaron su apoyo de manera invaluable. Sus consejos, guía y estímulo han sido fundamentales para nuestro crecimiento y desarrollo en este camino de aprendizaje.

Por último, pero no menos importante, expresamos nuestro agradecimiento a nuestra alma máter, la Universidad de Cundinamarca, por brindarnos la oportunidad de acogernos como nuestra casa del saber y por ser la plataforma que ha facilitado nuestro crecimiento académico y personal.

Resumen

Este documento presentó el diseño de un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) con el propósito de mitigar los armónicos de corriente en la red eléctrica generados por cargas no lineales. Los armónicos, que consisten en frecuencias múltiplos de la señal eléctrica fundamental, pueden reducir la eficiencia energética, causar sobrecalentamiento en los equipos y provocar problemas de interferencia electromagnética.

El sistema BESS se sincronizaba con los parámetros de tensión y frecuencia típicos de la red trifásica nacional. Para lograr la mitigación de armónicos en la red, inyecta corrientes en contrafase en el punto de conexión común (PCC) mediante una estrategia de control que genera comandos para modular el inversor con la técnica de modulación de espacio vectorial por ancho de pulso (SVPWM).

La simulación de la topología implementada se realizaba en la extensión de Simulink en el entorno proporcionado por el software MATLAB, donde se configura el sistema de almacenamiento con la estrategia de control implementada, conectándolo a la red eléctrica. En esta simulación, se evaluaban diversos escenarios de prueba para determinar el impacto de la capacidad nominal de la batería y los requisitos de carga en el sistema.

Los resultados de los escenarios de prueba se exponían y analizaban, evaluando el desempeño del sistema BESS frente a variaciones en los requerimientos de carga y la capacidad nominal de la batería. En este contexto, cabe mencionar que el mejor caso de prueba logró una reducción del THD a 5.61 %. Además, se destaca la capacidad del sistema para mantener un rendimiento estable incluso bajo condiciones de alta demanda, reduciendo la distorsión armónica al 12.24 %.

Abstract

This document presented the design of a Battery Energy Storage System (BESS) aimed at mitigating current harmonics in the electrical grid generated by non-linear loads. Harmonics, which consist of multiples of the fundamental electrical signal's frequency, can reduce energy efficiency, cause equipment overheating, and lead to electromagnetic interference issues.

The BESS system must be synchronized with typical voltage and frequency parameters of the national three-phase grid. To achieve harmonic mitigation in the grid, it injects currents in anti-phase at the Point of Common Coupling (PCC) using a control strategy that generates commands to modulate the inverter with the Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) technique.

Simulation of the implemented topology was conducted using the Simulink extension within the MATLAB software environment, configuring the storage system with the implemented control strategy and connecting it to the electrical grid. Various test scenarios were evaluated in this simulation to determine the impact of the battery's nominal capacity and load requirements on the system.

The results of the test scenarios were presented and analyzed, assessing the BESS system's performance under varying load requirements and battery nominal capacity. In this context, it is worth mentioning that the best test case achieved a 5.61 % reduction in Total Harmonic Distortion (THD). Furthermore, the system's capability to maintain stable performance, even under high-demand conditions, is highlighted, reducing harmonic distortion to 12.24 %.

Contenido

Resumen	6
Abstract	7
INTRODUCCIÓN	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
JUSTIFICACIÓN	16
ALCANCES Y LIMITACIONES	17
Alcances	17
Limitaciones	17
1. MARCO REFERENCIAL	18
1.1. ESTADO DEL ARTE	18
1.1.1. Reactivos	18
1.1.2. Armónicos	21
1.1.3. Variación de frecuencia	23
1.1.4. Fluctuación de tensión	25
1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
1.2.1. Conceptos clave	27
2. DISEÑO METODOLÓGICO	30
3. EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA BESS EN COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS	31
3.1. ANÁLISIS	31
3.2. DISEÑO	33
3.2.1. Marcos de referencia	34
3.2.2. Diseño de estrategia de control	35
3.2.3. SVPWM	36
3.2.4. Filtro LCL	38
3.3. IMPLEMENTACIÓN	39
3.3.1. Sistema de almacenamiento y conversión de energía	41
3.3.2. Punto de Conexión Común (PCC)	42
3.3.3. Prueba preliminar de implementación	43
3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	44
3.4.1. Primer escenario de prueba:	45
3.4.2. Segundo escenario de prueba:	46

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA CON Y SIN EL SISTEMA BESS	49
4.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS DE ONDA EN EL PCC	51
4.3. ANÁLISIS DE CASOS DE PRUEBA	52
4.3.1. Primer escenario de prueba	52
4.3.2. Segundo escenario de prueba	53
4.4. COMPARACIÓN CON SISTEMA ALTERNATIVO PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS	53
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	55
5.1. CONCLUSIONES	55
5.2. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO	56
5.3. PRODUCTOS DESARROLLADOS	56
BIBLIOGRAFÍA	58

Índice de figuras

Figura 1.	Mediciones experimentales de corriente y tensión [16].	19
Figura 2.	Respuesta dinámica de diferentes buses durante el periodo de inicio de los motores. (a) Bus 18 (b) Bus 22 (c) Bus 23 (d) Bus 28 [17].	20
Figura 3.	Pruebas de corrección del factor de potencia en diferentes escenarios de prueba [18].	21
Figura 4.	Análisis armónico de la corriente [1].	23
Figura 5.	Modelo dinámico del sistema BESS [20].	24
Figura 6.	Esquema de control de regulación de tensión BESS [21].	26
Figura 7.	IEEE-13 bus de perfil de voltaje, a) esquema de regulación de voltaje tradicional b) esquema de regulación de voltaje propuesto.	27
Figura 8.	Fases proyecto BESS	30
Figura 9.	Esquema general del proyecto.	34
Figura 10.	Lazo de control.	35
Figura 11.	Bloque de armónicos.	35
Figura 12.	Vectores de referencia SVPWM [44].	37
Figura 13.	Esquema del filtro LCL.	38
Figura 14.	Diagrama de bode filtro LCL	39
Figura 15.	Esquema general Simulink.	40
Figura 16.	Lazo de control.	41
Figura 17.	Sistema de almacenamiento y conversión de energía	41
Figura 18.	Descarga de la batería	42
Figura 19.	PCC.	43
Figura 20.	(a) Caso sin sistema BESS, (b) Caso de prueba 10 A, 63 Ah.	44
Figura 21.	Forma de onda en prueba 5 A, 63 Ah.	45
Figura 22.	THD en prueba 5 A, 63 Ah.	46
Figura 23.	Forma de onda en prueba 5 A, 10 Ah.	47
Figura 24.	THD en prueba 5 A, 10 Ah.	47
Figura 25.	Red sin intervención del sistema BESS.	49
Figura 26.	THD de la red sin intervención del sistema BESS.	50
Figura 27.	Forma de onda en prueba 5 A, 20 Ah.	50
Figura 28.	Formas de onda de corriente del inversor, red y carga.	51
Figura 29.	THD de la red sin implementación del sistema BESS con 30 A de requerimiento de carga.	53

Índice de tablas

Tabla 1.	Comparación del THD en diferentes escenarios de prueba. . . .	22
Tabla 2.	Escenario de prueba de reducción de inercia del 50%	25
Tabla 3.	Parámetros de diseño del filtro	38
Tabla 4.	Variación de requerimiento de corriente en la carga	46
Tabla 5.	Variación de la capacidad nominal en la batería.	47

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la generación de energía eléctrica mediante el uso de FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovable) ha experimentado un aumento exponencial, principalmente por la necesidad de reducir las emisiones de CO₂. La intermitencia en la generación de energías de las FNCER en su potencia de salida y el incremento de cargas no lineales en la red eléctrica hacen que sea esencial el uso de baterías para contar con un recurso energético almacenado disponible en cualquier momento y lugar [1].

En zonas afectadas por diversas irregularidades en la red de distribución, como los fenómenos relacionados con la calidad de la potencia, la administración eficaz de la generación de energía eléctrica se vuelve crucial para asegurar un suministro constante y eficiente. En consecuencia, se busca la implementación de microrredes que incorporen FNCER con el objetivo de proporcionar cobertura y confiabilidad en el suministro eléctrico en ZNI (Zonas No Interconectadas).

Debido al elevado costo asociado al almacenamiento de energía mediante baterías, se ha impulsado su empleo como recurso auxiliar para mitigar los fenómenos relacionados con la calidad de la potencia eléctrica, gracias a su capacidad de almacenamiento, rápida respuesta y control preciso. En esta situación, las baterías desempeñan un papel esencial, ya que operan como sistemas de carga y descarga regulados mediante estrategias específicas de control para almacenar energía y mitigar los fenómenos mencionados.

En este contexto, se desarrolla un proyecto de investigación marco que implementa microrredes, integrando fuentes convencionales y no convencionales, con el objetivo de incrementar la cobertura, eficiencia energética y confiabilidad del servicio en el departamento de Cundinamarca. El propósito del proyecto se logra mediante el uso de tecnologías de almacenamiento de energía (ESS) integrado a una plataforma de red inteligente para el control, monitoreo y supervisión del sistema, dentro de las cuales se incluyen los sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS, por sus siglas en inglés, "Battery Energy Storage Systems").

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sector de generación energética abarca dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero y más del 80% de las emisiones de CO₂, según la Agencia Internacional de Energía (IEA) [2]. No obstante, según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la eficiencia energética y el empleo de fuentes de energía renovable tienen el potencial de reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 90% [3].

La transición hacia la energía renovable es esencial para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. De acuerdo con el informe más reciente de Estadísticas de Capacidad Renovable 2023 de la IRENA, se evidencia un crecimiento constante en el uso de fuentes de energía renovable en los últimos años. A finales de 2022, la capacidad mundial de generación renovable aumentó en un 9.6 %, representando un 83 % del total de la capacidad eléctrica añadida en ese mismo año [4].

En Colombia, en el año 2020, el consumo de energía renovable alcanzó el 31,31 % del consumo total de energía final, según el Banco Mundial, lo que refleja un notable incremento en la adopción de fuentes de energía sostenible en el país [5]. Además, se proyecta un crecimiento sostenido en el mercado de energía renovable, con una tasa compuesta anual estimada en más del 2,6 % durante el período de pronóstico que abarca desde 2020 hasta 2025 [6].

La utilización de fuentes de energía renovable se ha convertido en una solución fundamental para garantizar el acceso a la energía en aquellas zonas no interconectadas (ZNI) del país, ya que estas regiones abarcan aproximadamente el 52 % del territorio nacional [7]. En respuesta a los desafíos derivados de la falta de infraestructura energética en estas áreas remotas, el empleo de fuentes renovables se ha destacado como una alternativa efectiva para asegurar una fuente de electricidad confiable y sostenible.

Las fuentes de generación de energía tradicionales están diseñadas para ofrecer una producción constante y predecible de energía. En contraste, las FN-CER presentan desafíos de intermitencia debido a su dependencia a la disponibilidad de recursos naturales; El incremento en la utilización de cargas no lineales en los sistemas eléctricos ha ocasionado desafíos en cuanto a la calidad de la potencia eléctrica, generando la presencia de armónicos en la señal.

La presencia de armónicos en la red eléctrica tiene un impacto perjudicial en su calidad, dado que distorsiona la forma de onda eléctrica y afecta tanto a las cargas conectadas al sistema como a la infraestructura eléctrica en su totalidad [8]. Esta distorsión armónica resulta en un suministro eléctrico menos confiable, lo que aumenta el riesgo de interrupciones, fallos en equipos sensibles y un incremento en los costos de operación y mantenimiento [9].

La integración de energías renovables ha posibilitado el desarrollo de sistemas que ofrecen un suministro de energía confiable y sostenible, como las microrredes. Estas microrredes incluyen sistemas de almacenamiento, como las baterías, que no solo almacenan energía para asegurar su disponibilidad en cualquier momento y lugar, sino que también cuentan con servicios auxiliares para mitigar fenómenos relacionados con la calidad de la poten-

cia como los armónicos. Por lo anterior, se plantea el siguiente interrogante:

¿De qué manera los sistemas de almacenamiento con baterías pueden contribuir a la mitigación de armónicos en la red eléctrica?

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivo general

Evaluar el comportamiento de tecnologías de baterías en sistemas de almacenamiento (BESS) considerando la interacción con la red eléctrica bajo la influencia de armónicos.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica que permita contrastar resultados teóricos y experimentales reportados en la evaluación del comportamiento de sistemas de almacenamiento por baterías en interacción con la red eléctrica.
- Establecer escenarios de prueba de sistemas de almacenamiento integrando modelos de baterías y fenómenos de calidad de la potencia en la red eléctrica.
- Determinar mediante pruebas de simulación las mejores condiciones de operación en un sistema de almacenamiento por baterías para reducir los fenómenos de calidad de la potencia en la red.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, se evidencia un crecimiento sin precedentes en la generación de energía a partir de fuentes renovables, el almacenamiento de la misma y su aplicación en microrredes. Esta tendencia representa un hito significativo en la búsqueda de un futuro energético más sostenible y eficiente [10]. Sin embargo, a medida que se avanza hacia un mayor uso de energías limpias, también surgen desafíos críticos relacionados con la calidad de la energía suministrada a través de la red eléctrica.

En este contexto, el Plan Nacional de Desarrollo de Colombia para el período 2023-2026 ha establecido un objetivo central de transición energética justa y sostenible [10]. El propósito central de esta transición es reducir la dependencia de los combustibles fósiles y energías no renovables, que contribuyen al 44% de las emisiones de gases de efecto invernadero [11]. Este objetivo busca fomentar de manera activa el empleo de fuentes de energía limpias y renovables, con el propósito de beneficiar a las comunidades más necesitadas.

En el contexto de Colombia, la regulación establece un límite de distorsión armónica total del 5% hasta el noveno armónico, reduciéndose aún más al 3% para los armónicos de mayor orden [12]. Dentro de este marco normativo, se ha identificado que los armónicos de tercer, quinto y sexto orden son los más significativos y problemáticos en la red eléctrica del país [13].

En este sentido, se lleva a cabo la evaluación del comportamiento de sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías, considerando la influencia de los armónicos relacionados con la calidad de la potencia. El objetivo principal es mejorar la eficiencia y la confiabilidad del servicio de energía en comunidades, especialmente en las áreas no interconectadas del país, alineado con el propósito del proyecto marco “Desarrollo de Microredes y almacenamiento (ESS) prestadores de servicios complementarios para incrementar la cobertura, eficiencia y confiabilidad del servicio en el departamento de Cundinamarca” [14].

La investigación y los estudios centrados en la mejora de la calidad de la energía aportarán significativamente a la Universidad de Cundinamarca en diversas áreas, incluyendo el fortalecimiento de la investigación en el campo de la electrónica, el desarrollo regional y la creación de alianzas con diversas instituciones educativas y gubernamentales que compartan objetivos en línea con el plan nacional de desarrollo.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

Este trabajo de investigación tiene como propósito contribuir a la mitigación de armónicos generados por cargas no lineales en la red eléctrica trifásica mediante el aprovechamiento de la energía almacenada en baterías.

El diseño del sistema se desarrolla mediante simulación en la extensión de Simulink dentro del entorno proporcionado por el software MATLAB, tomando como referencia varios artículos de revisión bibliográfica. La estrategia de control del diseño consiste en la inyección de corrientes en contrafase desde la batería para mitigar armónicos; la batería tiene una tensión nominal de 400 V y la red trifásica opera a 220 V en cada fase con una frecuencia fundamental de 60 Hz. En total, el sistema cuenta con una capacidad de operación máxima de 10 kVA.

A través de varios escenarios de prueba, el sistema logra reducir la distorsión armónica total al alcanzar un mínimo del 5.61 % en su mejor caso de prueba y una disminución del 12.24 % en su nivel de mayor demanda de carga.

Limitaciones

Los escenarios de prueba se desarrollan en un entorno controlado y simulado, por lo que no pueden abordar todas las variabilidades y complejidades del mundo real, como fluctuaciones en la carga, condiciones ambientales y otros factores que pueden influir en la eficacia de la estrategia.

El enfoque del proyecto se centra en aspectos técnicos y operativos, sin abordar consideraciones económicas, como los costos asociados a la implementación de la estrategia de control y la adquisición de baterías. Por otra parte, se busca mejorar la calidad de la potencia eléctrica, pero no se examinan en profundidad las regulaciones y normativas nacionales que podrían tener un impacto significativo en la implementación del sistema en situaciones reales.

1. MARCO REFERENCIAL

En esta sección, se abordan investigaciones a nivel global centradas en resolver fenómenos relacionados con la calidad de la potencia eléctrica, tales como la presencia de reactivos, armónicos, variaciones de frecuencia y fluctuaciones de tensión. Además, se presentan los fundamentos teóricos que el lector debe considerar al explorar este documento.

1.1. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, ha tenido lugar un crecimiento sin precedentes en la generación de energía a partir de fuentes renovables. De manera paralela, se ha producido un incremento masivo en la adopción de cargas no lineales en entornos residenciales [15]. Si bien estos avances representan un paso significativo hacia un futuro energético más sostenible y eficiente, también han dado lugar a una serie de desafíos relacionados con la calidad de la energía suministrada a través de la red eléctrica.

En este contexto, emergen los Sistemas de Almacenamiento de Energía por Baterías (BESS, por sus siglas en inglés) como una solución para mitigar problemas en el suministro de energía eléctrica. El propósito de esta sección es investigar y analizar las diversas fuentes de información consultadas en relación con el proyecto en cuestión. A través de la siguiente revisión bibliográfica, se exploran en detalle los enfoques, investigaciones y desarrollos previos en el campo de los sistemas BESS.

1.1.1. Reactivos

Los reactivos son necesarios para mantener la tensión o el flujo de corriente en una red eléctrica, aunque no realizan trabajo útil directo. Por lo tanto, se indagan proyectos que buscan mitigar los efectos de los reactivos mediante el uso de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en microrredes o la utilización de STATCOM con el mismo propósito, tales como:

Estrategia de control que utiliza un sistema de gestión de energía (EMS) como fuente de corriente, con el propósito de alcanzar un factor de potencia unitario en una microrred. El prototipo ha sido diseñado y construido en el laboratorio de la Naval Postgraduate School (NPS), con el fin de cumplir con los estándares de eficiencia energética establecidos por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) [16].

El EMS administra tanto los Recursos Energéticos Distribuidos (DERs) como las cargas, incluyendo las críticas como las no críticas. Para lograr un control preciso de la potencia activa y reactiva, el sistema implementa un lazo de retroalimentación para la inyección de potencia en el Punto de Acoplamiento Común (PCC) [16].

En la **Figura 1** se presenta una comparación entre las formas de onda de la red. En la **Figura 1 (a)**, se muestra el ángulo de fase entre la tensión y la corriente cuando el EMS no está en funcionamiento. Cuando el EMS entra en funcionamiento, como se aprecia en la **Figura 1 (b)**, las mediciones experimentales demuestran que el ángulo de fase entre la tensión y la corriente se reduce a 0, lo que permite alcanzar un factor de potencia unitario.

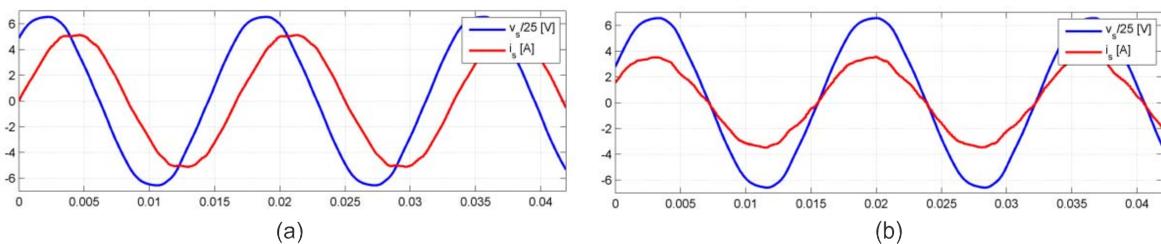


Figura 1. Mediciones experimentales de corriente y tensión [16].

A continuación, se presenta una metodología desarrollada por Dey y colaboradores para la compensación de potencia reactiva en microrredes industriales operando en modo aislado. Esta metodología combina soluciones estáticas y dinámicas con el objetivo de mejorar la eficiencia y estabilidad del sistema. En particular, la microrred en cuestión presenta un conjunto de cargas inductivas, incluyendo diversos motores eléctricos.

La solución estática implica la incorporación estratégica de condensadores derivativos en ubicaciones específicas con el propósito de atenuar las fluctuaciones de tensión presentes en las cargas. Por contraste, la solución dinámica consiste en la implementación de un STATCOM, un compensador que inyecta o absorbe potencia reactiva en el sistema en función de las necesidades. Este componente desempeña un papel esencial al facilitar una rápida recuperación de la tensión durante el proceso de arranque de los motores [17].

El sistema cuenta con 43 buses de red con una capacidad conjunta de 21 MW y 9 MVAR. En varios buses, se encuentran instalados 28 motores y 16 transformadores reductores. Un análisis realizado por Dey y colaboradores [17] proporcionan una visión de la respuesta dinámica del sistema, que se muestra en la **Figura 2**. Antes de transcurrir 0.2 segundos, en ausencia del STATCOM, la tensión desciende a 0.58 p.u del valor nominal, con un tiempo de recuperación de 733 ms.

Después de la implementación del STATCOM, la tensión durante la fase de arranque desciende 0.67 p.u y se recupera en un lapso de 313 ms. Este análisis demuestra que la introducción de capacitores y el uso del STATCOM permiten reducir tanto las fluctuaciones de tensión como el tiempo de respuesta del sistema de manera efectiva.

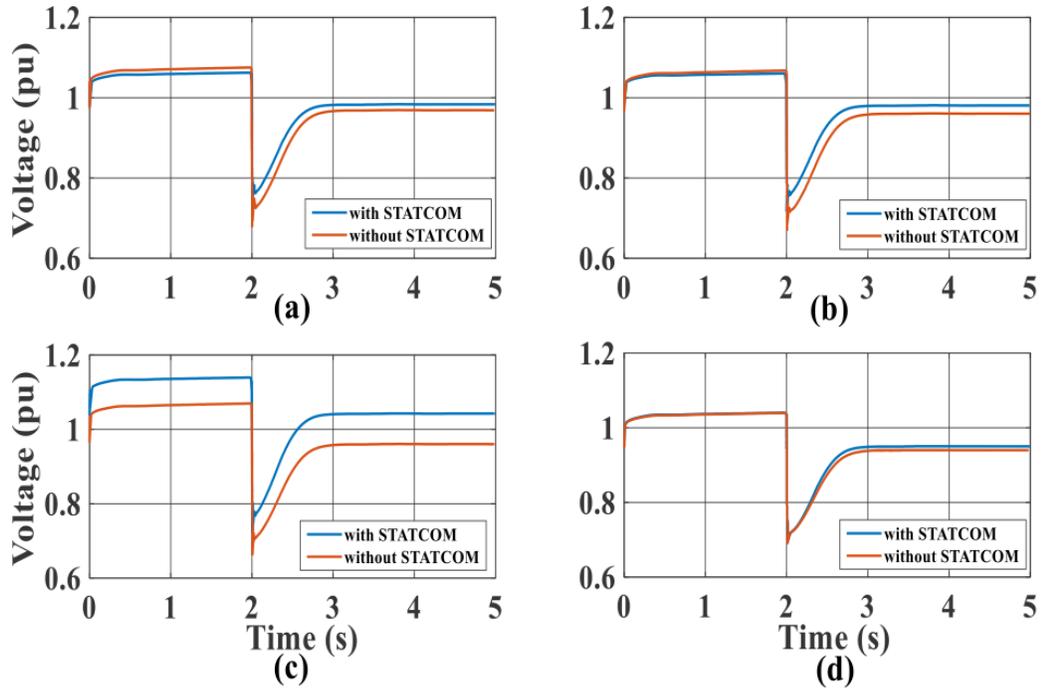


Figura 2. Respuesta dinámica de diferentes buses durante el periodo de inicio de los motores. (a) Bus 18 (b) Bus 22 (c) Bus 23 (d) Bus 28 [17].

Los sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) se utilizan para mitigar las fluctuaciones de potencia a través de estrategias de control que compensan la potencia reactiva. Rajabinezhad y colaboradores [18] abordan este problema mediante diversos métodos de procesamiento de señales aplicados a una microrred. Esta microrred opera en conexión con la red principal y está compuesta por un sistema de turbinas eólicas, una carga constante, un sistema de baterías y su correspondiente sistema de control. El propósito principal de esta configuración es la reducción de las fluctuaciones, donde se establecen dos métodos para el control del nivel de suavizado de potencia: la transformada de wavelet continuo online (OCWT) y el filtro pasa bajas de alto orden (HOLPF).

El HOLPF tiene un bajo rendimiento para frecuencias por debajo de 0.01Hz. Los filtros diseñados con este método minimizan la ondulación máxima en bandas generales de magnitud en su respuesta en frecuencia. Los parámetros de diseño incluyen frecuencia de banda de paso (0.01 Hz), frecuencia de ban-

da de parada (0.05 Hz), ondulación en la banda de paso (1 dB), y atenuación en la banda de parada (60 dB) para un rendimiento óptimo. OCWT es una transformación que captura el contenido de la señal en tiempo y frecuencia a través de una matriz, cuya inversa elimina las bajas frecuencias. Debido al efecto de borde, se omite el último 15% de los valores de la ventana de datos, lo que causa un retraso de segundos en la observación de nuevos eventos.

En la **Figura 3**, se presentan comparaciones de las formas de onda de potencia. Estas comparaciones se realizan teniendo en cuenta, tanto la implementación como sin ella y están relacionadas con los métodos de procesamiento de señales utilizados en el diseño del filtro interno del control. Los resultados indican que el HOLPF presenta un comportamiento atenuado, lo que provoca malfuncionamientos debido a los retrasos entre la potencia inyectada por el BESS y los componentes de alta frecuencia en la salida de la turbina eólica. Por otro lado, se demuestra que el CWT es el filtro más apropiado debido a su menor tiempo de retraso y su precisión en el comportamiento.

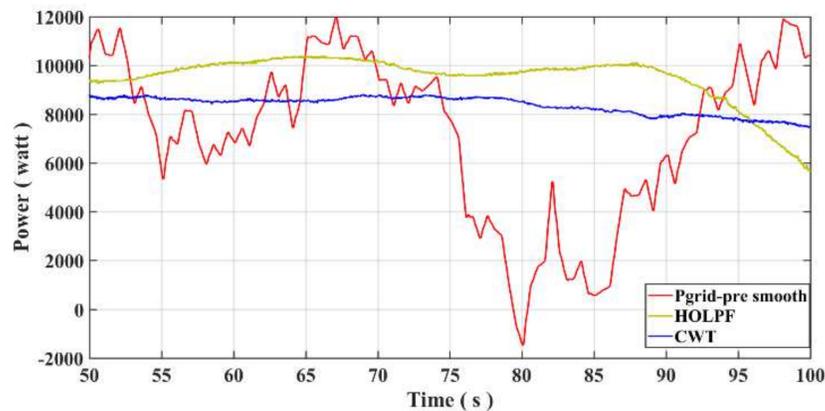


Figura 3. Pruebas de corrección del factor de potencia en diferentes escenarios de prueba [18].

1.1.2. Armónicos

Los armónicos son fluctuaciones de señales de tensión o corriente que se producen en una red eléctrica y que poseen frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental. Para mitigar estos armónicos, se han llevado a cabo investigaciones previas que utilizan sistemas BESS en combinación con filtros activos o controladores.

Babu y colaboradores [19] han desarrollado un proyecto que combina un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) con un filtro activo de potencia (APF). El APF opera como un compensador derivativo conectado en paralelo a la red eléctrica con el propósito de mitigar los armónicos presentes en la carga.

Cuando el sistema BESS está ausente, el APF tiene exclusivamente la función de compensación de armónicos, sin tener la capacidad de gestionar la potencia activa. En contraste, la integración del sistema BESS con el APF permite un control y regulación efectivos del flujo de potencia entre el PCC y el APF [19].

Se lleva a cabo un análisis de la Distorsión Armónica Total (THD) a través de tres escenarios de prueba diferentes. Estos escenarios consideran tanto la integración exclusiva del APF como la integración del sistema BESS durante el tiempo de carga y descarga. Los resultados se presentan en la **Tabla 1**, evidenciando que el THD es menor cuando la batería está en modo de carga. Por el contrario, durante la fase de descarga, se observa un aumento en el THD debido a las variaciones en la corriente que se manifiestan en ese instante.

Tabla 1. Comparación del THD en diferentes escenarios de prueba.

Escenario de prueba	THD (%)
Sin batería	3.62
Batería descargando	4.1
Batería cargando	2.33

El proyecto siguiente se enfoca en el desarrollo de controladores basados en la estructura del controlador Proporcional-Resonante(PR) para tratar los problemas de desbalance de corriente y armónicos en la red eléctrica. La configuración de la microrred comprende una estación de paneles solares (PV) y una batería, que actúan como dispositivos de generación y almacenamiento distribuidos, respectivamente.

El controlador Proporcional-Resonante(PR) simplifica la mitigación de armónicos en la red al regular las ondas sinusoidales. En cuanto al sistema de baterías, está compuesto por dos grupos conectados en serie, cada uno con una potencia máxima de 1 MW [1].

Se comparó el THD entre el sistema con el controlador y el sistema sin él utilizando los resultados obtenidos, en relación a los estándares establecidos por IEEE. Dichos estándares establecen que el valor debe ser del 4% para armónicos de orden 9 o inferior, y del 2% para armónicos de orden 15 o inferior [1].

Los resultados se visualizan en la **Figura 4**. Se observa que los armónicos quinto y undécimo exceden los límites cuando el controlador no está habilitado. Con la asistencia del controlador, todos los armónicos de orden impar están por debajo de

los límites propuestos por IEEE. El THD sin el controlador es del 11.3%, mientras que con el controlador es del 5.1 %

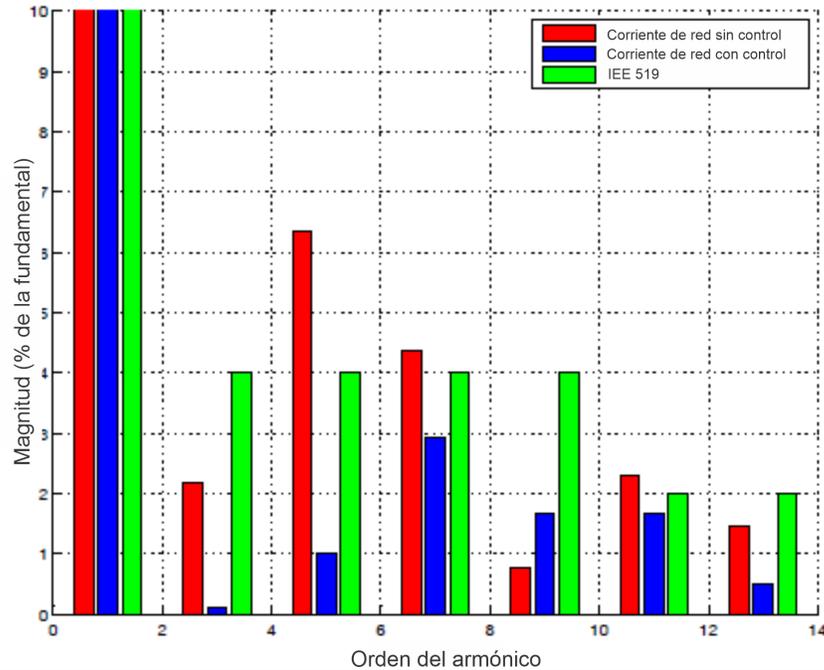


Figura 4. Análisis armónico de la corriente [1].

1.1.3. Variación de frecuencia

La reducción de la inercia en los sistemas eléctricos tiene un impacto significativo en la estabilidad de la frecuencia, generando un desequilibrio entre la generación y la demanda de energía. Como respuesta a esta problemática, se implementan compensadores síncronos y sistemas de almacenamiento de energía (BESS) con el propósito de preservar la estabilidad del sistema.

En la isla de Cerdeña, Italia, se implementa un sistema BESS que satisface una demanda máxima de energía de 1500 MW a una frecuencia estándar de 50 Hz. El sistema desarrollado se visualiza en la **Figura 5**, donde la batería se modela como una función de transferencia de primer orden. Se utiliza Δf como referencia, el cual representa el PFC (control de frecuencia primaria), para simular la inercia virtual mediante $\frac{df}{dt}$.

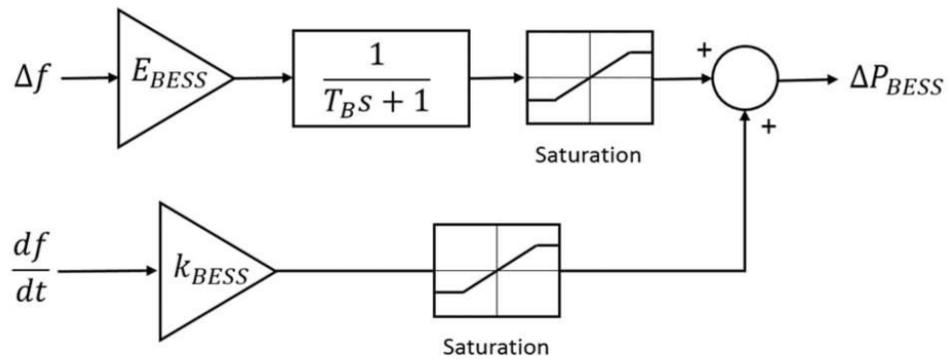


Figura 5. Modelo dinámico del sistema BESS [20].

La evaluación de la estabilidad de frecuencia del sistema se realiza mediante el análisis de eventos de subfrecuencia y sobrefrecuencia, tanto en situaciones pasadas como futuras, teniendo en cuenta la disminución de la inercia como factor clave. Se realiza un análisis que considera las oscilaciones de frecuencia en los valores más bajos, también conocidos como "nadir" en inglés, junto con la tasa más alta de cambio de frecuencia, denominada como "ROCOF" por sus siglas en inglés. En la condición inicial, la frecuencia nadir es de 49.77 Hz y la tasa ROCOF es de 0.56 Hz/seg [20].

En la **Tabla 2**, se registran los valores correspondientes a la frecuencia nadir y la tasa ROCOF al reducir la inercia en un 50% como lo detalla el estudio realizado por el ingeniero Mosca y colaboradores [20]. En el primer escenario, la frecuencia nadir disminuye de 49.77 Hz a 49.38 Hz, mientras que la tasa ROCOF aumenta de 0.56 Hz/seg a 1.07 Hz/seg, lo cual crea una situación desfavorable para el sistema. Sin embargo, mediante la implementación de compensadores y sistemas de almacenamiento de energía (BESS), la inercia del sistema se incrementa, lo que resulta en una mejora del 0.9% en los factores analizados.

Tabla 2. Escenario de prueba de reducción de inercia del 50 %

Escenario de prueba	nadir (Hz)	ROCOF (Hz/s)
Condiciones iniciales		
1	49.38	1.066
Incorporación de compensador síncrono		
6	49.52	0.787
10	49.26	0.623
Incorporación de sistema BESS		
2	49.63	0.946
3	49.64	0.946
4	49.49	0.85
5	49.71	1.066
6	49.74	0.85
7	49.76	0.85
8	49.56	0.707
9	49.79	1.066

1.1.4. Fluctuación de tensión

Los denominados “sags” y “swells” de tensión, provocan ineficiencias y daños en la red eléctrica. El siguiente sistema propone la regulación de tensión a través de la coordinación inteligente entre un sistema BESS y un Regulador de Derivación Bajo Carga (OLTC), con el objetivo de minimizar las fluctuaciones de voltaje; esto se logra aprovechando la energía generada por paneles solares

La energía solar se recolecta a partir de un inversor de 1 MW ubicado en una instalación de energía solar fotovoltaica de 3 MW. En este sistema, los voltajes de los buses se controlan en dos niveles. Cuando los voltajes de los buses alcanzan los límites extremos, el sistema BESS entra en acción y regula los voltajes a nivel local. Sin embargo, si esto no es suficiente para regular el voltaje, entonces el control es asumido por el OLTC para regular el voltaje a nivel global [21].

El sistema BESS emplea el esquema de control local, haciendo uso de la potencia activa almacenada para regular la tensión. Este control se rige por el Estado de Carga (SOC) y la desviación de tensión en el punto de conexión. El esquema de control se representa en la **Figura 6** e incluye la activación de los voltajes máximos

o mínimos, el monitoreo del SOC y el control del flujo de potencia en función de la disponibilidad y la demanda de energía.

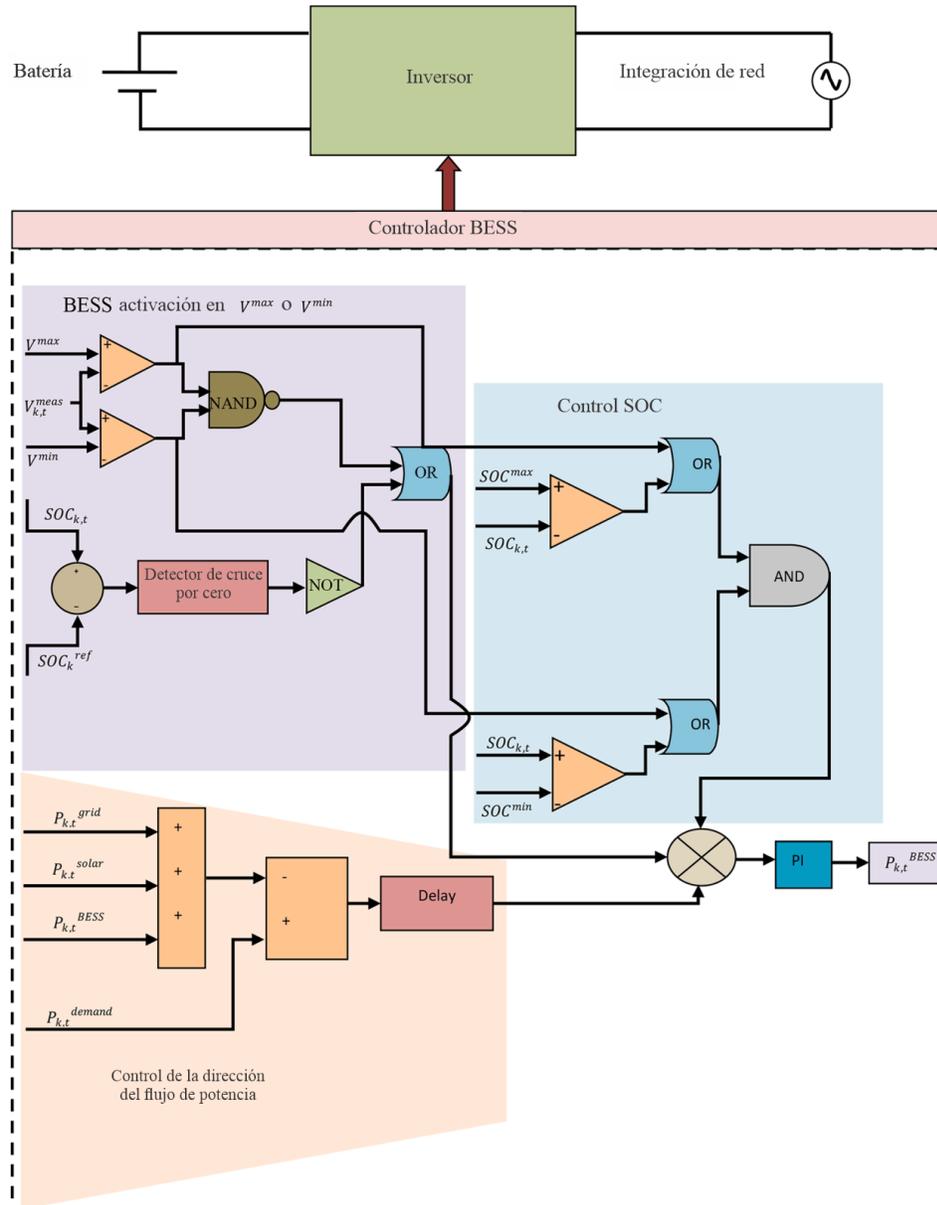


Figura 6. Esquema de control de regulación de tensión BESS [21].

Con el fin de prolongar la vida útil de la batería, se impone una restricción en el SOC del 50 % al 80 %. La **Figura 7** muestra la regulación de voltaje, permitiendo una comparativa entre un sistema de tensión convencional y el sistema propuesto en el proyecto donde se observa una notable mejora en los problemas de sobretensión. El tiempo promedio de incidencia de sobretensión se reduce en un factor de 2.8. De manera similar, en el caso donde la tensión tiene el mínimo valor, el tiempo

promedio disminuye en casi 6 veces en comparación con el esquema de control tradicional [21].

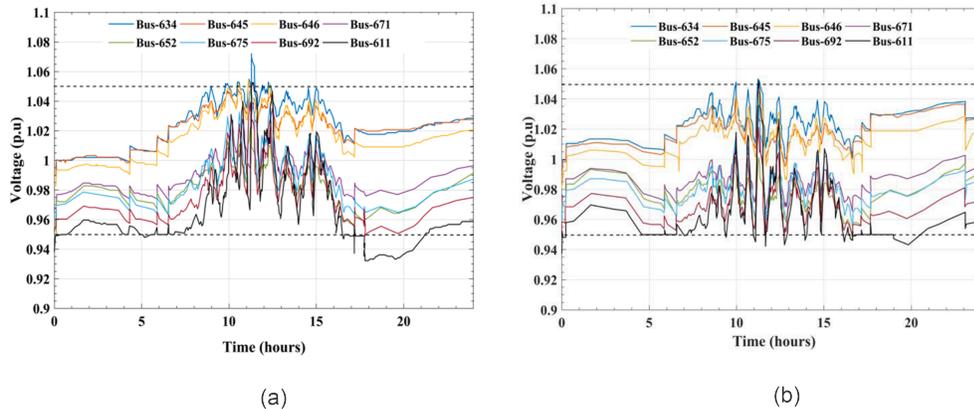


Figura 7. IEEE-13 bus de perfil de voltaje, a) esquema de regulación de voltaje tradicional b) esquema de regulación de voltaje propuesto.

En esta sección, se han identificado hallazgos relevantes en el campo de estudio, donde se observa un notorio aumento en la generación de energía a partir de fuentes renovables y la creciente adopción de cargas no lineales, lo que plantea desafíos en la calidad del suministro eléctrico. Las investigaciones han propuesto estrategias de control mediante sistemas de almacenamiento de energía por baterías (BESS) para abordar fenómenos relacionados con la calidad de la potencia, como armónicos, fluctuaciones de tensión y variaciones de frecuencia. Por ende, los sistemas BESS se destacan como una solución altamente efectiva para resolver estos problemas y mejorar significativamente la calidad de la red eléctrica.

1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este apartado, se abordan los aspectos esenciales para explorar los conceptos, principios y normas clave en el desarrollo del proyecto. El objetivo principal es proporcionar al lector una revisión preliminar de los fundamentos teóricos que sustentan el sistema, con el propósito de contextualizar de manera efectiva el funcionamiento del proyecto.

1.2.1. Conceptos clave

Una microrred es un clúster que integra diversas tecnologías, como la generación distribuida, fuentes de energía locales y la gestión de cargas, todo ello conectado a través de una red eléctrica en la que se gestiona integralmente la generación, el almacenamiento de energía y las necesidades de las cargas de los usos finales [22].

Un componente esencial dentro de una microrred es el Sistema de Almacenamiento por Baterías (BESS). El BESS es un sistema de baterías que almacena energía de diferentes fuentes. Consta de una o más baterías y se puede utilizar para equilibrar la red eléctrica, proporcionar energía de respaldo y mejorar la estabilidad de la red [23].

En este contexto, es relevante considerar la capacidad nominal de una batería, medida en amperios-hora (Ah). El parámetro indica la cantidad máxima de carga eléctrica que la batería puede almacenar o proporcionar bajo condiciones específicas. Evaluar la autonomía de una batería basándose en su capacidad nominal es fundamental, ya que permite estimar con precisión el tiempo durante el cual un dispositivo podrá funcionar antes de que se agote la energía almacenada [24].

Asimismo, en el ámbito de la transmisión y distribución eléctrica, el STATCOM es un dispositivo utilizado para controlar la tensión y la potencia reactiva. Actúa como un regulador de tensión dinámico, ajustando continuamente la cantidad de potencia reactiva que inyecta o absorbe en la red eléctrica para mantener la tensión en niveles óptimos [25]. La potencia reactiva es un componente de la potencia eléctrica que no realiza trabajo útil de manera directa. Su presencia en exceso puede resultar en pérdidas de energía y disminuir la eficiencia de la red eléctrica.

El Sistema de Gestión de Energía (EMS) controla y optimiza una variedad de fuentes de energía distribuida, como paneles solares, turbinas eólicas y sistemas de almacenamiento de energía. El EMS actúa como el núcleo del sistema, coordinando los DERs para asegurar un suministro de energía confiable y eficiente en la microrred [16]. Los DERs o Recursos Energéticos Distribuidos, constituyen una amplia gama de tecnologías y recursos ubicados en sistemas eléctricos, que incluyen fuentes de energía renovable a pequeña y mediana escala, medidas de eficiencia energética, almacenamiento tanto físico como virtual, así como la gestión de la demanda eléctrica. La finalidad de los DER radica en promover la adopción de energías renovables, reducir la demanda de energía en momentos de alta necesidad y mejorar la flexibilidad del sistema eléctrico, garantizando así la seguridad del suministro eléctrico [26].

En un entorno de suministro de energía eléctrica y control de calidad, la presencia de armónicos en la tensión o la corriente es un factor importante a considerar. Los armónicos son frecuencias expresadas como múltiplos enteros de una frecuencia fundamental que se suman a la señal original y distorsiona la forma de onda [27]. Para abordar este problema, existen diversas soluciones, como lo es el Filtro Activo de Potencia (APF), el cual es un dispositivo diseñado para mitigar el impacto de las corrientes armónicas generadas por las cargas y mejorar la calidad de la potencia eléctrica en el sistema eléctrico. El APF opera como una solución efectiva para contrarrestar las perturbaciones causadas por las corrientes armónicas, lo que

resulta en un suministro de energía más estable y confiable en la red eléctrica [19].

La Distorsión Armónica Total (THD) es la relación entre la suma de todos los valores eficaces (RMS) de los diferentes armónicos y el valor RMS de la frecuencia fundamental. Por lo general, este valor se expresa en porcentaje y refleja en qué medida la forma de onda de la tensión o la corriente se deforma en comparación con una onda sinusoidal [27]. Normativas como la IEEE 519 proporcionan directrices para la evaluación y control de armónicos y desviaciones de tensión en sistemas de potencia eléctrica. La norma establece límites para los niveles de armónicos admisibles y define cómo medirlos de manera precisa, facilitando la presentación de los resultados de las pruebas. Un aspecto relevante de esta norma es que establece como criterio que el THD de la corriente armónica total no debe exceder el 5% en sistemas eléctricos alimentados por corriente alterna. Esta restricción se encuentra diseñada para controlar la cantidad de armónicos presentes en la corriente eléctrica, contribuyendo así a garantizar la calidad de la energía suministrada y prevenir problemas potenciales en equipos y dispositivos eléctricos [28].

2. DISEÑO METODOLÓGICO

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el proyecto, se establecen las siguientes fases (**Figura 8**).

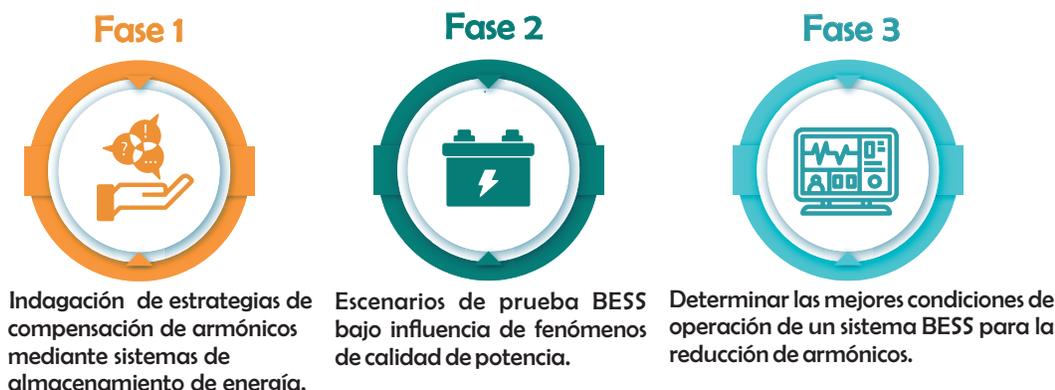


Figura 8. Fases proyecto BESS

- **Fase 1:** se investiga el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías bajo la influencia de la red eléctrica. El propósito es realizar una comparación para seleccionar las metodologías y estrategias empleadas en la corrección de fenómenos relacionados con la calidad de la potencia eléctrica, específicamente en los armónicos de la señal de corriente.
- **Fase 2:** se establecen escenarios de prueba mediante la simulación de diversas topologías de sistemas de almacenamiento que incorporan modelos de baterías, teniendo en cuenta los fenómenos relacionados con la calidad de la potencia en la red eléctrica. Posteriormente, se procede a realizar modificaciones en los escenarios de prueba con el propósito de evaluar el comportamiento y desempeño del sistema ante alteraciones en la red eléctrica.
- **Fase 3:** se llevan a cabo pruebas técnicas simuladas del sistema con el fin de ajustar parámetros como la distorsión armónica, en diferentes escenarios de prueba. A través del análisis llevado a cabo se establecen las mejores condiciones de funcionamiento para la topología del sistema de almacenamiento por baterías, teniendo en cuenta tecnologías de conversión de potencia, calidad de potencia y especificaciones técnicas.

3. EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA BESS EN COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS

En esta sección, se presenta un análisis detallado del diseño del sistema propuesto, abordando las necesidades que este sistema satisface y resaltando los requisitos fundamentales que orientaron su desarrollo. Se ofrece una descripción completa del diseño, que incluye las estrategias de control y los parámetros esenciales para una comprensión del sistema en cuestión. Por último, se lleva a cabo la implementación, lo que posibilita la realización de pruebas de funcionamiento para evaluar su desempeño en múltiples escenarios, con un enfoque particular en la detección y mitigación de armónicos en la red eléctrica.

3.1. ANÁLISIS

La calidad de la energía eléctrica es de suma importancia a nivel global ya que influye directamente en la operación segura y eficiente de los sistemas eléctricos. Numerosos fenómenos relacionados con la calidad de la potencia inciden de manera considerable en su deterioro, siendo los armónicos una de las principales causas de esta problemática [29].

Los armónicos son componentes de una señal que tienen frecuencias múltiplo de la señal eléctrica fundamental, se generan principalmente debido a cargas no lineales presentes en la red, como inversores, variadores de velocidad y dispositivos electrónicos de potencia [30]. La generación de armónicos resulta en un aumento importante en la Distorsión Armónica Total (THD), lo que a su vez provoca la reducción de la eficiencia energética, el sobrecalentamiento de los equipos y la aparición de problemas de interferencia electromagnética [31].

En Colombia, la regulación eléctrica se basa en una serie de normativas y estándares internacionales, incluyendo la norma IEEE 519 [28] y los estándares IEC 61000-4-15 [32], junto con la NTC 5001 [33]; estos marcos normativos establecen los límites máximos permitidos en lo que respecta a la presencia de armónicos en la red eléctrica. El propósito fundamental de estas regulaciones es asegurar la calidad óptima de la energía entregada a los consumidores y prevenir potenciales inconvenientes relacionados con la distorsión armónica. Para sistemas eléctricos con una tensión inferior a 69 kV en el Punto de Conexión Común (PCC), se ha establecido un límite máximo de distorsión armónica de corriente del 5% [28].

A nivel nacional, se han llevado a cabo estudios relacionados con la presencia de armónicos en los sectores residenciales, comerciales e industriales, co-

mo el estudio realizado por Gallego et al [13]. En algunos casos, se registraron valores de THD que alcanzaron hasta un 12%, superando los límites establecidos por la norma IEC 61000-4-15 para las distorsiones armónicas.

De acuerdo con Blanco et al [12], en Colombia, los armónicos de séptimo orden presentan una magnitud menor en comparación con los armónicos de quinto, noveno y decimoquinto orden. Específicamente, son los armónicos de quinto orden los que superan los límites normativos en algunas partes del país. En algunos casos, los excesos en los límites de armónicos se deben a una cancelación deficiente de armónicos generados por dispositivos electrónicos en grandes industrias.

El informe de calidad del servicio de energía, realizado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, revela que en Cundinamarca se experimentan interrupciones del servicio, con una duración promedio de 17.3 horas anuales y una frecuencia de aproximadamente 17.4 eventos por año. Las interrupciones se originan tanto por factores exógenos como por inconvenientes intrínsecos a la infraestructura de la red, como es el caso de los armónicos [34].

Los armónicos, cuyas causas son controlables, pueden ser gestionados por sistemas de control con el objetivo de mantener niveles aceptables de calidad de la energía eléctrica, asegurando un suministro adecuado de energía. Para lograrlo, es necesario realizar un análisis general de los sistemas, que implica comprender tanto la naturaleza de las cargas como las fuentes de alimentación, con el fin de anticipar los efectos en la conexión. Por lo tanto, es fundamental poseer conocimiento de las condiciones locales en el proceso de mitigación de los problemas relacionados con la calidad de la energía, para así aplicar de manera efectiva las estrategias y metodologías necesarias.

Dada la situación expuesta, es evidente la necesidad de desarrollar soluciones efectivas centradas en la mitigación de armónicos en Colombia, donde la red eléctrica exhibe distorsiones ocasionadas por cargas no lineales. Para abordar esta problemática, se identifican las necesidades del sistema en la mitigación de armónicos encontrados en la red y se cumplen con los siguientes requerimientos:

- **Integración de baterías:** el sistema debe integrar baterías como un servicio auxiliar para lograr una corrección eficaz de armónicos mediante la energía almacenada.
- **Compatibilidad con la conexión trifásica:** el sistema debe ser compatible y asegurar su eficacia en sistemas eléctricos que operan en configuración trifásica, garantizando una solución versátil y adaptable a diversas configuraciones de red.

- **Sincronización con la red:** el sistema debe sincronizarse con la red eléctrica, lo que garantiza su eficacia y capacidad para operar en armonía con el diseño existente.
- **Integración de estrategia de control:** el sistema debe operar en conjunto con una estrategia de control diseñada para mitigar los armónicos en la red eléctrica.
- **Conexión permanente a la red:** el sistema de baterías debe garantizar la disponibilidad continua al mantener una conexión constante con la red eléctrica, que opera a los valores estándar de tensión de 220 V y frecuencia de 60 Hz, comúnmente establecidos en la red comercial.
- **Reducción de los armónicos predominantes:** el sistema debe ser eficaz en la reducción de la magnitud de los armónicos más prominentes dentro de un espectro que abarque los primeros 16 armónicos analizados.

3.2. DISEÑO

En la actualidad, se han desarrollado variados diseños y estrategias de control para abordar la mitigación de armónicos, tales como el empleo de filtros APF o diferentes controladores, los cuales se detallan en la sección 1.1.2. El sistema diseñado se implementa debido a que las baterías, además de su capacidad de almacenamiento de energía, permiten su uso como servicio auxiliar en la mitigación de armónicos en la red eléctrica.

Mediante el análisis del diseño propuesto en la sección 3.1, se identifican los diversos componentes del sistema desarrollado. En primer lugar, se encuentra un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías en paralelo con una tensión nominal de 400 V, utilizado tanto para el almacenamiento de energía como para proporcionar un servicio auxiliar destinado a la mitigación de armónicos a través de la inyección de corrientes en contrafase.

En segundo lugar, un inversor de dos niveles diseñado para convertir la corriente continua (DC) proveniente del sistema de almacenamiento de energía en corriente alterna (AC). Este inversor es un puente trifásico compuesto por tres brazos, cada uno con dos transistores IGBT, sumando un total de seis transistores en el sistema. Los transistores IGBT cumplen la función de interruptores electrónicos para regular tanto la tensión como la corriente de salida, lo que facilita la inyección de corriente en contrafase en la red eléctrica. En tercer lugar, se encuentra un filtro LCL diseñado para filtrar las componentes de alta frecuencia de corriente y tensión en la salida del inversor. El esquema del sistema se visualiza en la **Figura 9**.

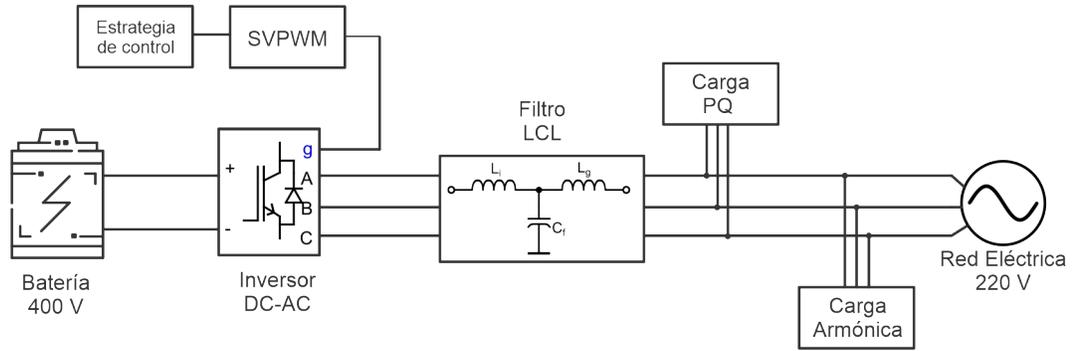


Figura 9. Esquema general del proyecto.

3.2.1. Marcos de referencia

Para modelar el sistema en el dominio del tiempo, se adopta inicialmente el marco de referencia ABC nativo [35]. No obstante, con el fin de simplificar el proceso matemático, se recurre a la utilización de marcos de referencia específicos para un control PQ en transformación de variables eléctricas [36], [37].

La transformación del marco de referencia trifásico (ABC) al marco de referencia de variables estacionarias DQ0 se lleva a cabo mediante la aplicación de la transformada de Clarke [38], [37]:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde x_α , x_β y x_0 son marcos de referencia estacionarios arbitrarios mientras que x_a , x_b y x_c son las variables eléctricas trifásicas.

Por otro lado, para simplificar el proceso de control, se utiliza una referencia de corriente continua (DC) en un marco síncrono mediante el uso de la transformada de Park [38]:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos (\theta_s - 2\pi/3) & \cos (\theta_s + 2\pi/3) \\ -\sin \theta_s & -\sin (\theta_s - 2\pi/3) & -\sin (\theta_s + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde x_d , x_q y x_0 son marcos de referencia rotatorios arbitrarios mientras que x_a , x_b y x_c son las variables eléctricas trifásicas.

3.2.2. Diseño de estrategia de control

Las señales de control de los transistores del inversor se generan mediante la técnica SVPWM (sección 3.2.3), utilizando una estrategia de control diseñada para compensar los armónicos generados por las cargas conectadas a la red eléctrica.

En el lazo de control, se introduce una referencia de la señal sinusoidal de la red eléctrica. Dentro de este lazo, se ubica un control de compensación de armónicos que se compara con la corriente medida desde el inversor ($I_{ABC_{inversor}}$). Esta comparación genera una señal de error que es procesada por un controlador PID, con el fin de operar el SVPWM. El lazo de control, se visualiza en la **Figura 10**.

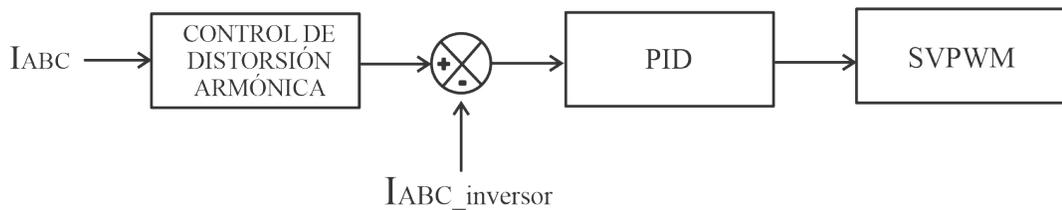


Figura 10. Lazo de control.

Como se mencionó previamente, el control de compensación de armónicos (**Figura 11**) recibe una señal sinusoidal de referencia de la red eléctrica, la cual es sincronizada por un lazo de seguimiento de fase (PLL) y posteriormente transformada al marco de referencia rotatorio (d,q) como parte de los parámetros de entrada.

La señal se compara con su valor promedio para eliminar la componente de corriente continua, lo que permite determinar las componentes armónicas del sistema. La elección de emplear un valor promedio en lugar de otros sistemas con la misma función, como un filtro pasa bajos, se basa en consideraciones esenciales. En sistemas que exigen respuestas en tiempo real, como en el control, la utilización de un filtro pasa bajos podría introducir un retraso en la señal. Por otra parte, el valor promedio se destaca por su menor latencia y simplicidad. Finalmente, se realiza una transformación al marco de referencia trifásico para su posterior comparación con la señal $I_{ABC_{inversor}}$.

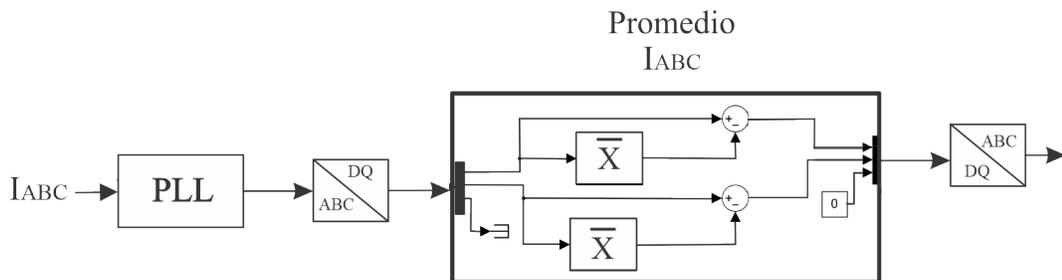


Figura 11. Bloque de armónicos.

El control PID minimiza el error entre la señal resultante de la comparación entre la salida del controlador de compensación de armónicos y la señal del conmutador del inversor (I_{ABC}), con el fin de realizar ajustes en la señal que se ingresa al algoritmo de modulación por vector espacial (SVPWM) [39].

El uso de un controlador PID en lugar de otros en este escenario se basa en la capacidad de los controladores PID para proporcionar un equilibrio entre la respuesta en tiempo real, la eliminación del error acumulado y la reducción de cambios abruptos en la señal de corriente [40]. Las constantes del controlador son :

- Proporcional: la constante proporcional se fija en un valor de 500, lo que indica una sensibilidad a las variaciones en el error actual y es apropiada para mantener una sintonía precisa con la señal de referencia.
- Integral: la constante integral se fija en un valor de 20, lo que implica que se considera cuidadosamente el error acumulado a lo largo del tiempo sin llevarlo al extremo. Este valor moderado para la componente integral se justifica cuando se busca una atenuación gradual del error acumulado.
- Derivativo: la constante derivativa se ha fijado en un valor de 5 para suavizar la respuesta del sistema sin provocar una disminución excesiva de la velocidad de respuesta.

Finalmente, la señal de salida del PID se transforma al marco de referencia estacionario arbitrario (α, β) como paso previo al control SVPWM.

3.2.3. SVPWM

A través de las señales de control, se generan los comandos para activar o desactivar los transistores IGBT en el inversor. En este caso, se utiliza la modulación por ancho de pulso de espacio vectorial (SVPWM por sus siglas en inglés), utilizando las tensiones en un marco de referencia estacionario (α, β) como variables de entrada.

En sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS), el SVPWM (Modulación de Ancho de Pulso de Vector Espacial) destaca sobre técnicas convencionales como PWM (Modulación de Ancho de Pulso) y SPWM (Modulación de Ancho de Pulso Sinusoidal) por varios motivos. Genera una forma de onda de corriente de salida más similar a una onda sinusoidal, reduciendo la distorsión y mejorando la calidad de la energía. Además, optimiza la eficiencia energética al minimizar las pérdidas asociadas con la conmutación y la conducción, lo que maximiza el uso de la energía almacenada en las baterías. Su capacidad para aprovechar de forma más eficiente los vectores de voltaje permite transiciones más suaves y precisas entre los estados de voltaje, mejorando significativamente la respuesta del sistema y la precisión del control en comparación con técnicas convencionales [41].

El inversor de dos niveles se controla mediante ocho posibles estados de conmutación, a partir de los cuales se establecen diversos vectores de salida. Esto se debe a que, en un sistema trifásico, solo puede estar activo un IGBT por cada una de las líneas trifásicas en un instante de tiempo dado. En consecuencia, tres transistores IGBT de los seis disponibles se activan simultáneamente en todos los brazos donde cada uno de ellos puede estar en uno de los dos estados posibles en un momento específico [42].

Estos ocho estados de conmutación son esenciales para determinar la forma de onda de salida y, por lo tanto, controlar la tensión y la frecuencia de la señal de salida del inversor. La combinación adecuada de estos estados de conmutación permite generar la forma de onda deseada en las fases de salida, lo que es fundamental para el funcionamiento eficiente del sistema.

De los ocho estados de conmutación, seis corresponden a las diferentes tensiones aplicadas, mientras que los dos restantes se refieren a cero. Un diagrama vectorial se crea, como se muestra en la **Figura 12**, con un ángulo de 60 grados entre cada uno de sus componentes, incluyendo dos vectores nulos en el centro, lo que da lugar a seis cuadrantes disponibles [43].

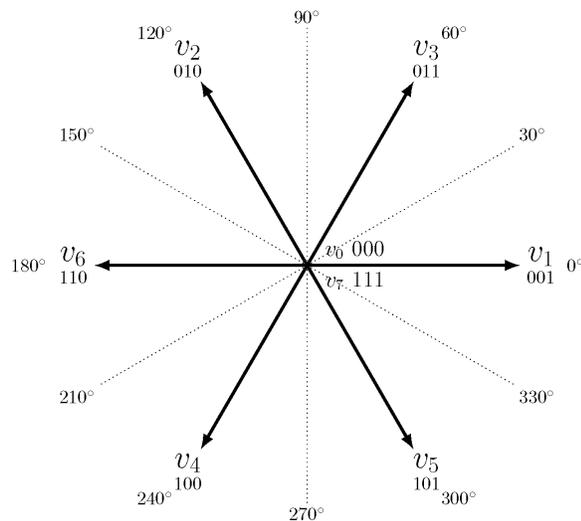


Figura 12. Vectores de referencia SVPWM [44].

A través de los términos de entrada en el SVPWM, se establece un vector de voltaje de referencia que, a su vez, determina la configuración de activación y desactivación de los IGBTs. La modulación SVPWM se utiliza debido a su capacidad para generar una forma de onda de corriente cercana a la deseada, lo que permite un control preciso de los interruptores IGBT y en consecuencia, aumenta la eficiencia energética. En comparación con otras técnicas de modulación, el SVPWM se des-

taca por su capacidad para reducir la distorsión armónica y minimizar las pérdidas de conmutación en los dispositivos de potencia del inversor [45].

3.2.4. Filtro LCL

En comparación con un filtro L, los filtros LCL cubren un espectro de frecuencia más amplio lo que los hace altamente efectivos para la mitigación de armónicos y distorsiones de alta frecuencia [46]. Esta capacidad de amplio rango de frecuencias es esencial para mejorar significativamente la calidad de la potencia eléctrica suministrada, lo que los hace una opción idónea para estos fines. La representación del filtro se muestra en la **Figura 13**.

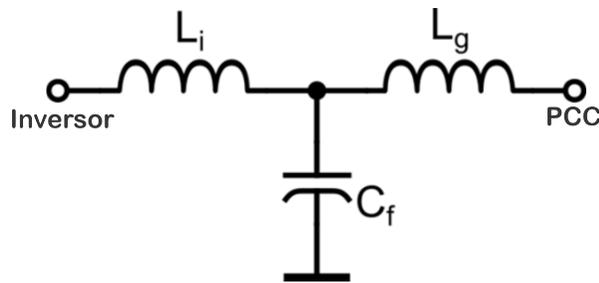


Figura 13. Esquema del filtro LCL.

El propósito principal del diseño del filtro LCL es suavizar la forma de onda de las señales de corriente y tensión de salida del inversor [47]. Con los parámetros de entrada del sistema que se encuentran en la **Tabla 3**, se realiza el diseño del filtro.

Tabla 3. Parámetros de diseño del filtro

Parámetros de diseño	
Tensión de red	220 V
Tensión nominal de la batería	400 V
Frecuencia de red	60 Hz
Frecuencia de conmutación	10 kHz
Potencia de salida del inversor	1 kW

La **ecuación 3** se utiliza para calcular la inductancia junto al inversor, representada

como L_i .

$$L_i = \frac{V_{DC}}{16 \cdot f_{switching} \cdot \Delta I_{max}} \quad (3)$$

La fluctuación de corriente se encuentra limitada a un máximo de 10 %, representado por $\Delta I_{L_{max}}$:

$$\Delta I_{L_{max}} = 0.01 \frac{P_{outinversor} \cdot \sqrt{2}}{V_{red}} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que la red eléctrica acepta una variación máxima de potencia del 5 %, el capacitor ha sido diseñado de acuerdo a este criterio.

$$C_f = \frac{0.05 \cdot P_{outinversor}}{V_{red}^2 \cdot \omega_{red}} \quad (5)$$

Por último, se calcula la inductancia del lado de la red L_g :

$$L_g = r \cdot L_i \quad (6)$$

La **Figura 14** representa el diagrama frecuencial del filtro, proporcionando una representación gráfica detallada de su respuesta en frecuencia a partir de 1 kHz en adelante.

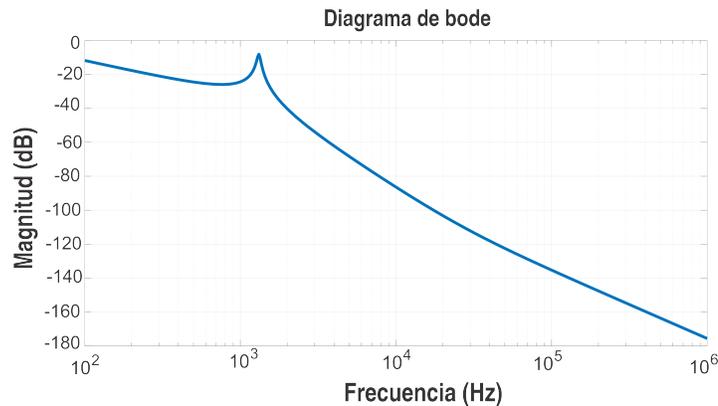


Figura 14. Diagrama de bode filtro LCL

3.3. IMPLEMENTACIÓN

El sistema, desarrollado en Simulink de MATLAB, se fundamenta en un BESS que desempeña un papel esencial en la mitigación de armónicos que impactan la calidad de la potencia eléctrica. En la **Figura 15** se observa el esquema general del sistema.

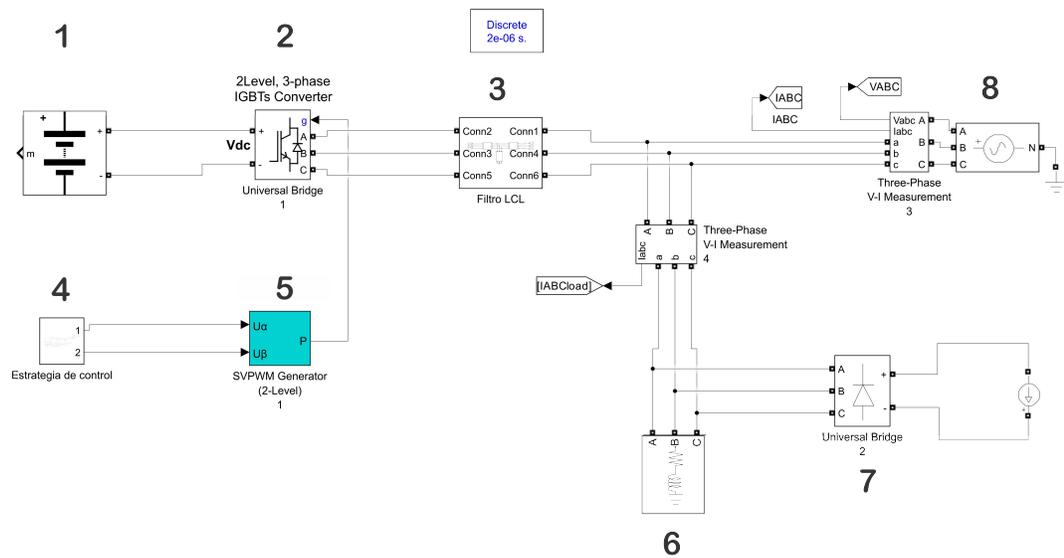


Figura 15. Esquema general Simulink.

Los componentes enumerados en la **Figura 15** son los siguientes:

1. Batería de ion de litio de 400V
2. Inversor
3. Filtro LCL
4. Estrategia de control
5. Generador de pulsos SVPWM
6. Carga PQ
7. Carga generadora de armónicos
8. Red eléctrica

El lazo de control en simulink está representado en la **Figura 16** para su visualización.

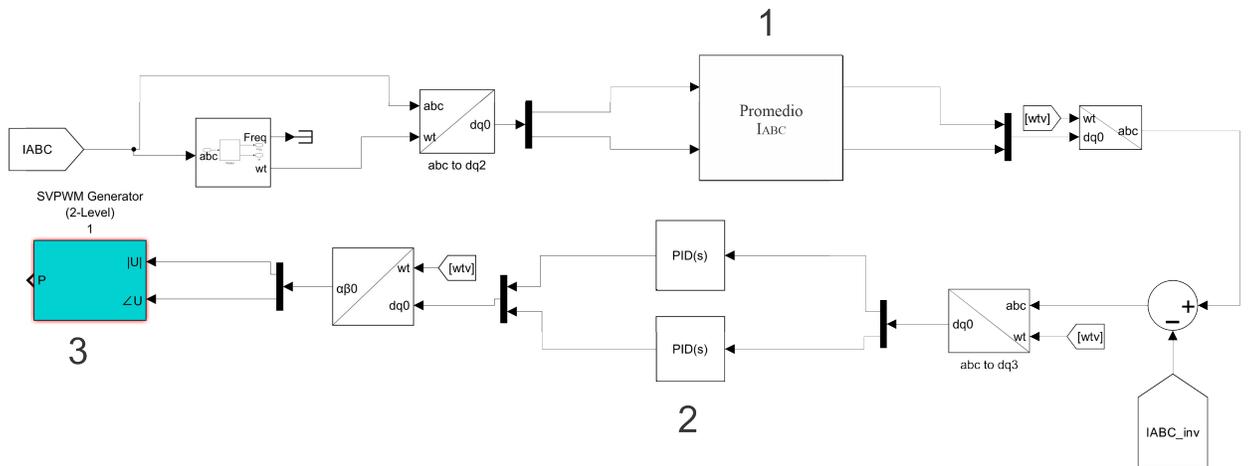


Figura 16. Lazo de control.

Los componentes enumerados en la **Figura 16** son los siguientes:

1. Promedio de señal
2. Controlador PID
3. Generador de pulsos SVPWM

3.3.1. Sistema de almacenamiento y conversión de energía

En la **Figura 17** se visualiza el sistema BESS que incluye la batería, el inversor y el filtro LCL.

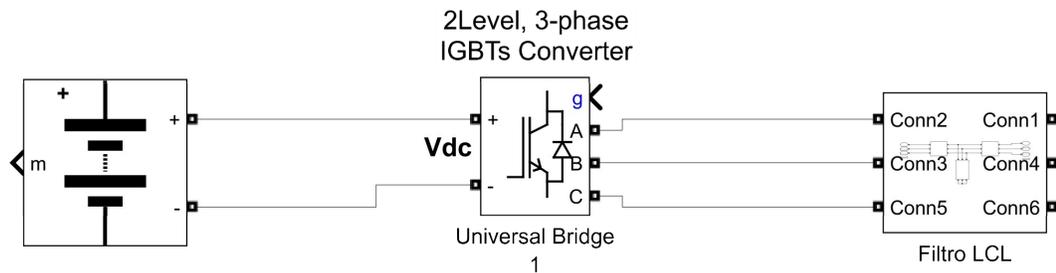


Figura 17. Sistema de almacenamiento y conversión de energía

• Batería

La elección de la batería para este estudio se fundamenta en las características nominales de una batería de ion de litio de alta densidad energética, específicamente del modelo RESU10H fabricado por LG Energy Solution Ltd [48]. Esta selección se basa en la capacidad intrínseca de las baterías de

iones de litio para ofrecer una respuesta rápida a las variaciones en la demanda de energía, lo que las convierte en una opción óptima para proporcionar una respuesta rápida y eficiente a los cambios en la carga eléctrica.

La batería posee una tensión nominal de 400 voltios y una capacidad nominal de 63 Ah; además, al inicio de la simulación, su estado de carga (SoC) se establece en el 100 %. La **Figura 18** ilustra la curva típica de descarga de una batería, dividida en cuatro zonas, donde la corriente de descarga máxima se mantiene en 30 A. A medida que la demanda de carga se incrementa, la velocidad de descarga de la batería se intensifica, resultando en una disminución más rápida de su capacidad de almacenamiento.

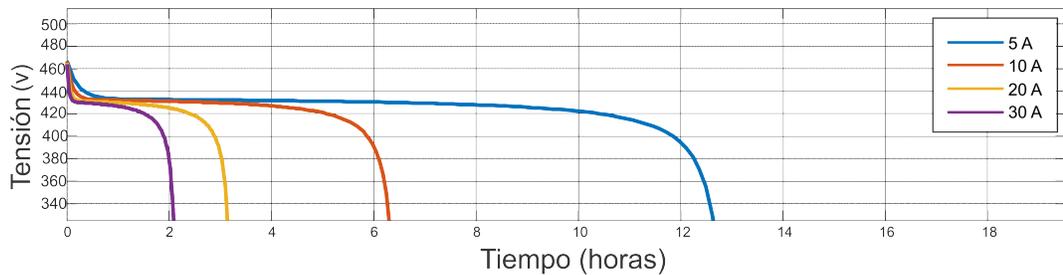


Figura 18. Descarga de la batería

El sistema propuesto se basa en la conexión en paralelo del inversor con la batería, generando así una señal de salida que es suavizada por un filtro LCL mediante la eliminación de componentes armónicas de alta frecuencia. La conexión en paralelo con la batería permite una respuesta rápida a las fluctuaciones de carga y la capacidad de inyectar o absorber energía según sea necesario para mantener la calidad de la energía eléctrica en niveles óptimos.

3.3.2. Punto de Conexión Común (PCC)

El punto de conexión común (PCC) establece la conexión eléctrica entre el sistema BESS, la red y las cargas no lineales. La conexión permite garantizar la operación coordinada y controlada de todos los componentes, contribuyendo a la estabilidad y la mejora de la calidad de la potencia eléctrica suministrada. La conexión se establece como se muestra en la **Figura 19**.

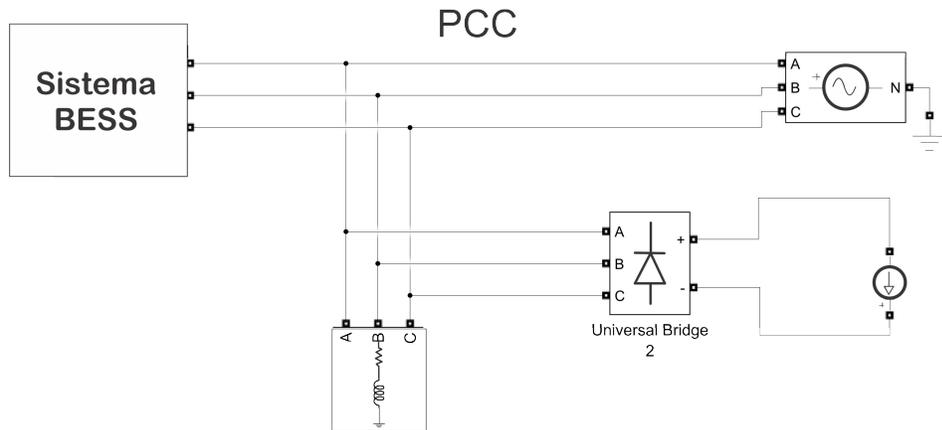


Figura 19. PCC.

El sistema BESS, que introduce una señal de corriente en contrafase, se conecta en paralelo con la red eléctrica para abordar la corrección de armónicos generados por las cargas no lineales. En el PCC, se gestiona la interacción de las cargas principales, incluyendo la carga PQ (potencia activa y reactiva) y la carga generadora de armónicos. De esta manera al supervisar y regular la calidad de la potencia eléctrica en las cargas, se garantiza tensiones y corrientes estables y sin fluctuaciones no deseadas.

Además, en este mismo punto, se logra realizar una detección temprana de anomalías y perturbaciones en la red eléctrica, lo que habilita una respuesta rápida y controlada para prevenir posibles inconvenientes en la operación del sistema BESS y las cargas.

3.3.3. Prueba preliminar de implementación

Se realiza una simulación tanto con el sistema BESS como sin el para verificar su funcionamiento. A partir de esta simulación, se obtienen las formas de onda de corriente en la carga que se muestran en la **Figura 20**.

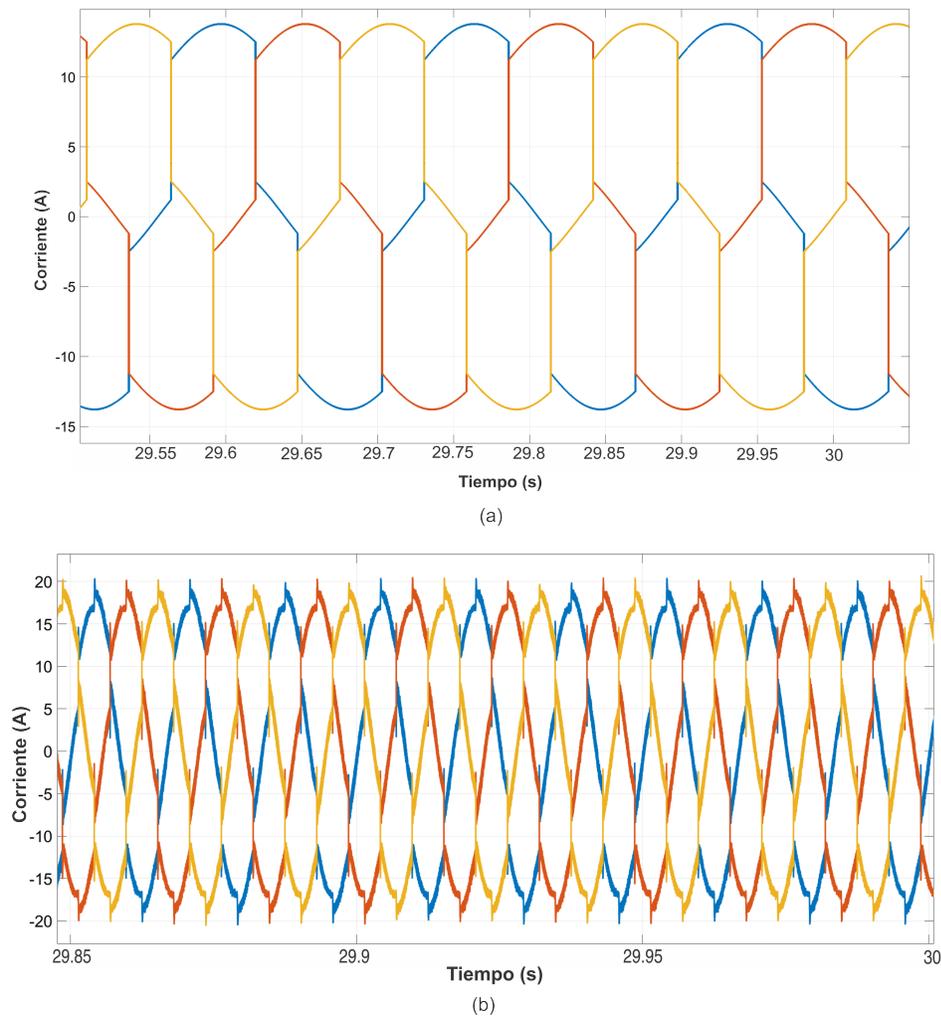


Figura 20. **(a)** Caso sin sistema BESS, **(b)** Caso de prueba 10 A, 63 Ah.

En la **Figura 20 (a)**, se evidencia la distorsión armónica de la señal de corriente en la red antes de la integración del sistema BESS, la cual se ve afectada por los armónicos presentes generados por las cargas. En la **Figura 20 (b)**, la forma de onda resultante muestra una notable similitud con una onda sinusoidal, lo que refleja una significativa mejora en la calidad de la señal eléctrica, gracias al sistema de compensación de armónicos implementado.

3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para las pruebas de funcionamiento se desarrollaron dos escenarios de prueba en el sistema que permiten evaluar y analizar el comportamiento del sistema BESS bajo la influencia de armónicos en la red eléctrica. Estos escenarios proporcionaron una visión integral para el análisis y la comprensión del comportamiento del

sistema en situaciones que involucran variaciones en la calidad de la potencia.

En paralelo a la red eléctrica se conectan dos tipos de cargas. La primera es una carga PQ que consta 1 kW de potencia activa (P) y 200 VAR de reactiva (Q), la cual es una carga RL convencional. Por otro lado, se encuentra una carga de armónicos, la cual genera distorsión en la red eléctrica. Esta carga está compuesta por un rectificador conectado a una fuente de corriente, emulando el comportamiento de un motor de corriente continua.

El sistema es simulado durante un periodo de 30 segundos con el objetivo de evaluar la distorsión armónica en el espectro frecuencial hasta el décimo sexto armónico utilizando la herramienta *FFT analyzer* en Simulink. La evaluación se centra en el análisis de los armónicos con mayor magnitud y menor frecuencia, en particular el quinto, séptimo, undécimo y decimotercer armónico, ya que debido a su proximidad a la frecuencia fundamental, tienen mayor incidencia en la distorsión armónica total.

3.4.1. Primer escenario de prueba:

En el primer escenario de prueba, se realizaron variaciones en los requisitos de carga para analizar el desempeño del sistema. En la **Figura 21** y **Figura 22**, se visualiza la forma de onda de corriente en la red eléctrica y el THD en el caso de prueba con una capacidad de batería de 63 Ah y una corriente de carga de 5 A.

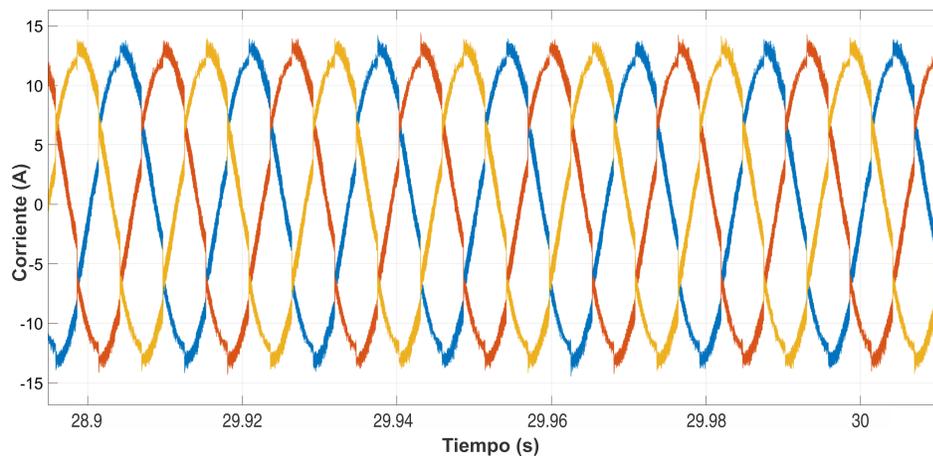


Figura 21. Forma de onda en prueba 5 A, 63 Ah.

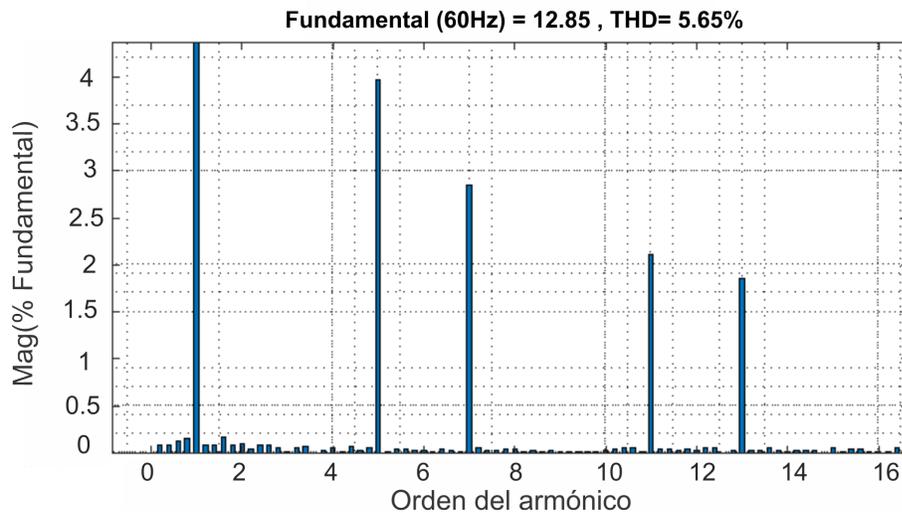


Figura 22. THD en prueba 5 A, 63 Ah.

En particular, se introdujeron variaciones en la carga con componentes armónicas (**Tabla 4**), aumentando gradualmente la demanda de corriente.

Tabla 4. Variación de requerimiento de corriente en la carga

Corriente de carga (A)	% THD	% 5° armónico	% 7° armónico	% 11° armónico	% 13° armónico
5	5.65	3.72	2.82	2.11	1.91
10	8.16	5.73	4.22	3.1	2.83
20	10.75	7.41	5.58	4.2	3.84
30	12.24	8.05	6.5	5.22	4.1

Los resultados de las pruebas demuestran una mejora significativa en la calidad de la señal eléctrica, con una reducción marcada en el THD de la señal. Esta reducción se traduce en una forma de onda más cercana a una sinusoidal de la red eléctrica, lo que indica una reducción de la distorsión armónica en el sistema, mejorando así la calidad de la potencia eléctrica suministrada.

3.4.2. Segundo escenario de prueba:

En el segundo escenario de prueba, se efectuaron variaciones a partir de la capacidad nominal de referencia de la batería, con el objetivo de analizar de qué manera las variaciones inciden en el funcionamiento del sistema. En la **Figura 23** y **Figura 24**, se visualiza la forma de onda en la red eléctrica y el THD en el caso de prueba con una capacidad de batería de 10 Ah y una corriente de carga de 5 A.

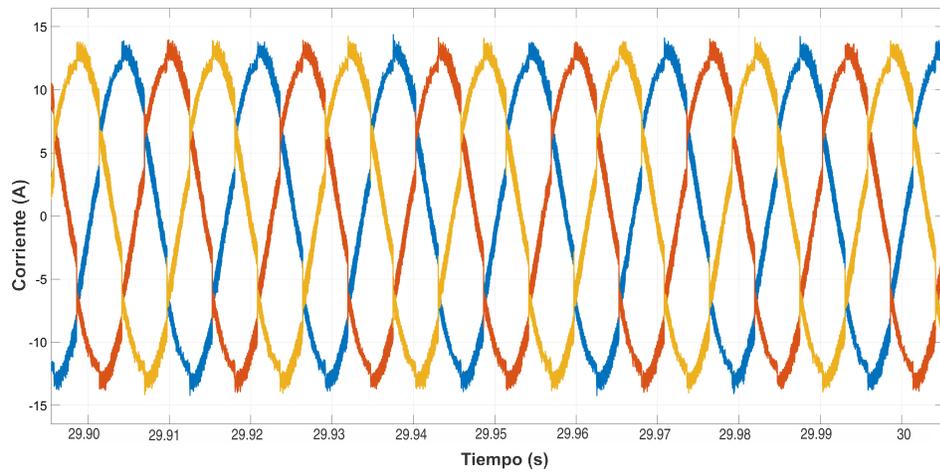


Figura 23. Forma de onda en prueba 5 A, 10 Ah.

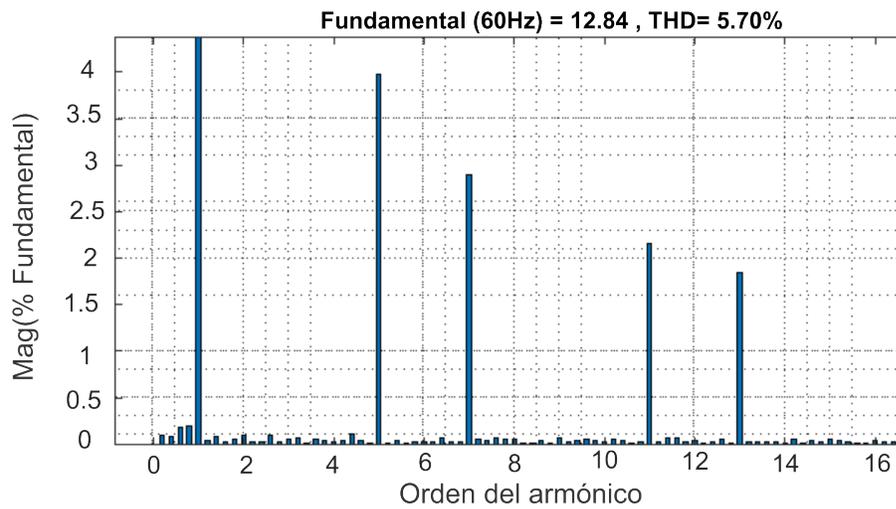


Figura 24. THD en prueba 5 A, 10 Ah.

Los resultados obtenidos de la prueba se visualizan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Variación de la capacidad nominal en la batería.

Capacidad nominal (Ah)	% THD	% 5° armónico	% 7° armónico	% 11° armónico	% 13° armónico
1	5.61	3.82	2.88	2.12	1.64
5	5.62	3.83	2.89	2.13	1.65
10	5.7	3.86	2.91	2.2	1.7
20	5.71	4	2.93	2.25	1.75
30	5.73	4.1	2.97	2.28	1.84

La forma de onda de corriente en la red y el THD son similares al primer escenario de prueba, ya que el análisis se realiza con el mismo requerimiento de carga pero con una capacidad nominal diferente. Los resultados son similares, con una reducción de la distorsión armónica y una aproximación de la forma de la onda sinusoidal de corriente del lado de la red eléctrica.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema diseñado ha sido sometido a un análisis de rendimiento y pruebas de funcionamiento que han abarcado una amplia gama de condiciones de carga, desde niveles mínimos hasta la máxima exigencia prevista. A partir de los resultados de los casos de prueba, se ha determinado que el sistema cuenta con una capacidad máxima de compensación de 10 kVA, garantizando un rendimiento óptimo incluso en situaciones de alta demanda.

4.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA CON Y SIN EL SISTEMA BESS

Antes de llevar a cabo los escenarios de prueba mencionados, se procede a la evaluación de la capacidad del sistema BESS para mitigar los armónicos. Para lograr esto, se compara la señal de salida de corriente de la red eléctrica sin la intervención del sistema BESS (**Figura 25**).

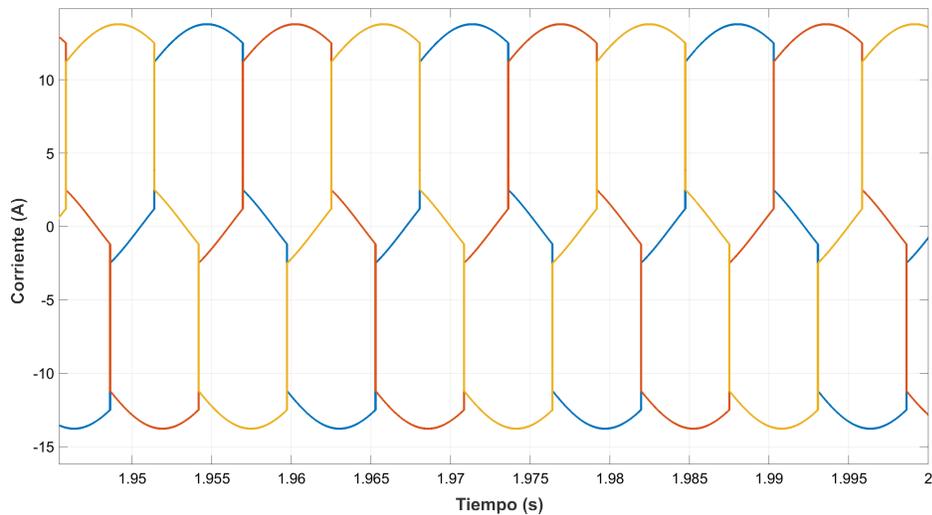


Figura 25. Red sin intervención del sistema BESS.

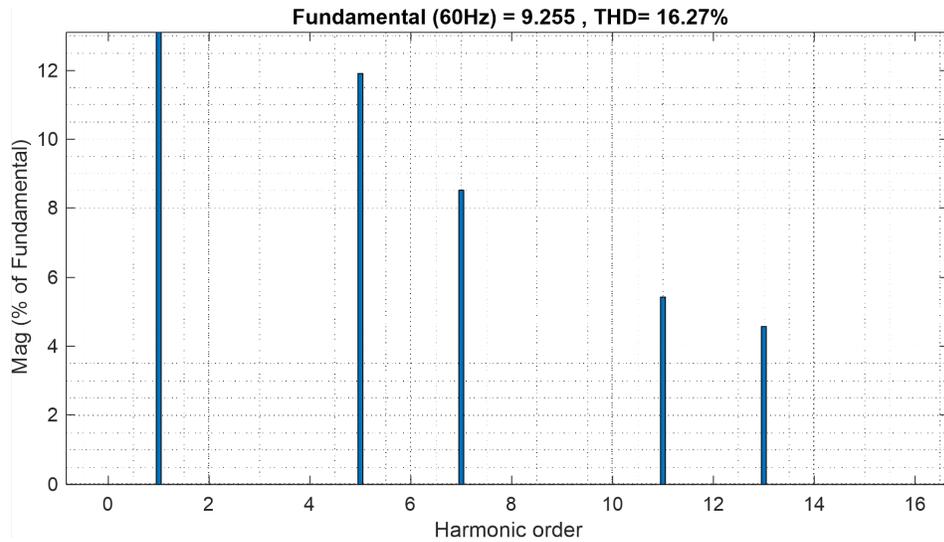


Figura 26. THD de la red sin intervención del sistema BESS.

La forma de onda de corriente de la red eléctrica muestra una alta distorsión armónica, superando el 15% y reflejando la forma de onda de la carga. Sin embargo, incorporando el sistema BESS con la estrategia de mitigación de armónicos se demuestra una considerable reducción de armónicos (**Figura 27**). Como resultado, la calidad de la potencia eléctrica suministrada mejora sustancialmente, aproximándose a una onda sinusoidal pura.

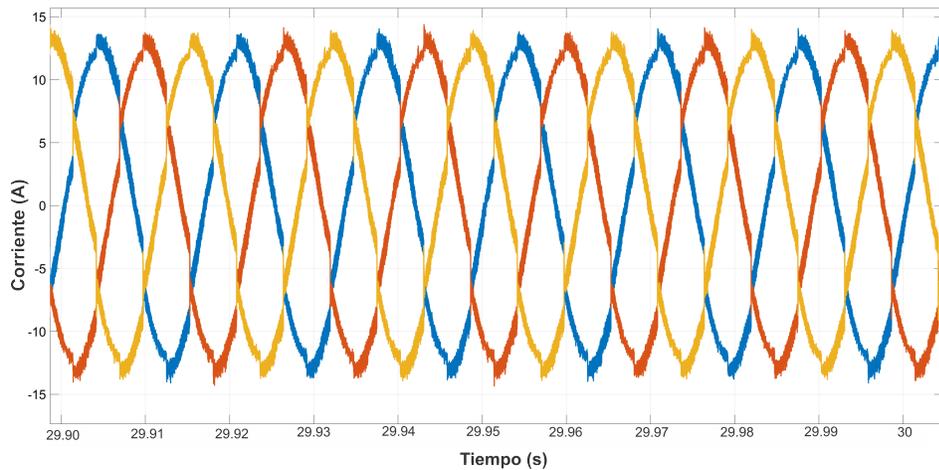


Figura 27. Forma de onda en prueba 5 A, 20 Ah.

4.2. ANÁLISIS DE LAS FORMAS DE ONDA EN EL PCC

La calidad de la señal de la red eléctrica se ve afectada por las cargas presentes en el sistema que generan armónicos. En la **Figura 28** se observan tres señales de corriente que corresponden a la carga, red e inversor respectivamente.

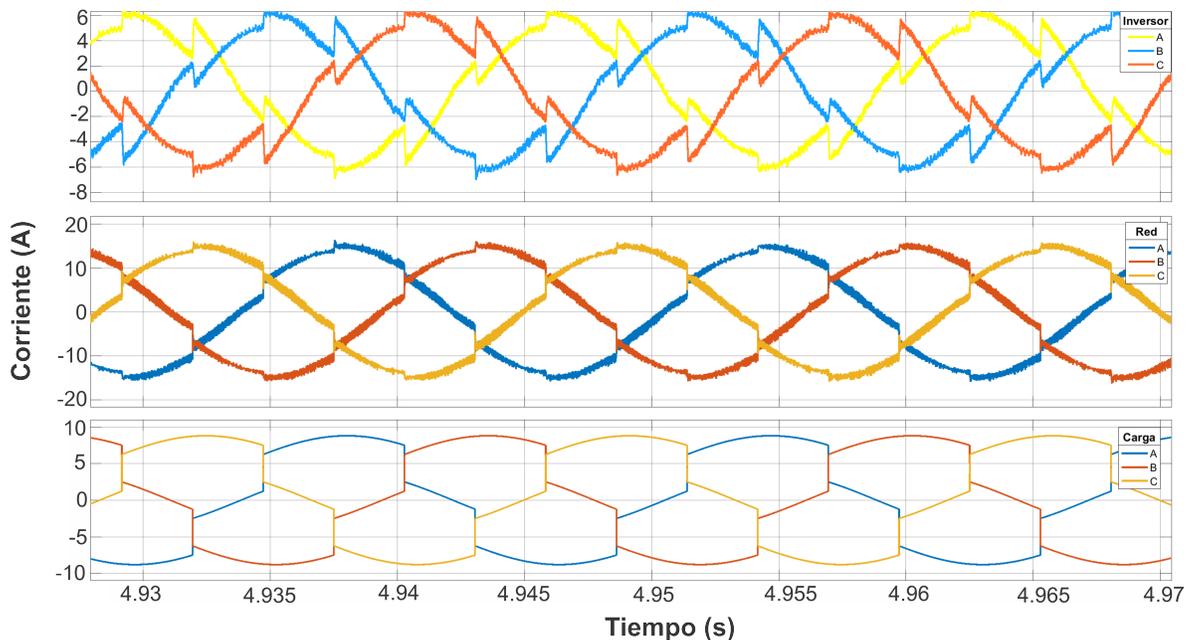


Figura 28. Formas de onda de corriente del inversor, red y carga.

En la señal de la **Figura 28** se representa la forma de onda de corriente en la carga, la cual tiene un impacto directo en la forma de onda de corriente en el lado de la red eléctrica. Además, se aprecia la señal de salida de corriente del inversor, que utiliza la energía almacenada en la batería para inyectar corrientes en el PCC, destacando la eficacia de la estrategia de control en la compensación de armónicos en el lado de la red eléctrica.

Las señales integradas en el punto de conexión común (PCC) son cruciales para el funcionamiento integral del sistema, permitiendo la sincronización y el ajuste de la interacción entre la carga, el inversor y la red eléctrica, lo que a su vez se traduce en una operación más eficiente y una notable mejora en la calidad de la potencia eléctrica.

4.3. ANÁLISIS DE CASOS DE PRUEBA

Los casos de prueba desarrollados en este trabajo de investigación tienen una naturaleza extrema en términos de requerimiento de carga, superando ampliamente lo que se encuentra en la red eléctrica convencional. Estos casos representan situaciones de alta demanda que ponen a prueba la eficiencia y capacidad del sistema BESS en condiciones que se encuentran más allá de las operaciones habituales en la red, lo que permite evaluar su rendimiento en escenarios críticos y extremos.

4.3.1. Primer escenario de prueba

En el primer escenario de prueba (**Tabla 4**), se lleva a cabo una variación en la demanda de carga para evaluar el comportamiento del sistema BESS. A medida que se incrementa la corriente requerida por la carga, se observa un aumento en el nivel de distorsión armónica. En particular, se identifica que los armónicos de quinto y séptimo orden son predominantes en el sistema.

Existen casos de prueba que cumplen con los estándares de la normativa 519 de la IEEE, con niveles de distorsión armónica (THD) cercanos al 5%. Esto se debe a que la demanda de carga en la red eléctrica, como se evidencia en las pruebas, generalmente se encuentra en el rango de 5 A a 10 A, lo que contribuye a mantener niveles de THD cercanos a los límites establecidos.

Por otro lado, en los casos de prueba que se alejan de los estándares recomendados, la demanda de carga es considerablemente mayor, llegando hasta 30 A. Sin embargo, el control implementado demuestra su eficacia al lograr una reducción de la distorsión armónica en un rango inferior al 12.24 %, en comparación con el sistema sin BESS, donde el THD alcanza un nivel cercano al 30 %, como se observa en la **Figura 29**. Esto resalta la capacidad del sistema para adaptarse y mantener un rendimiento aceptable incluso en condiciones de alta demanda

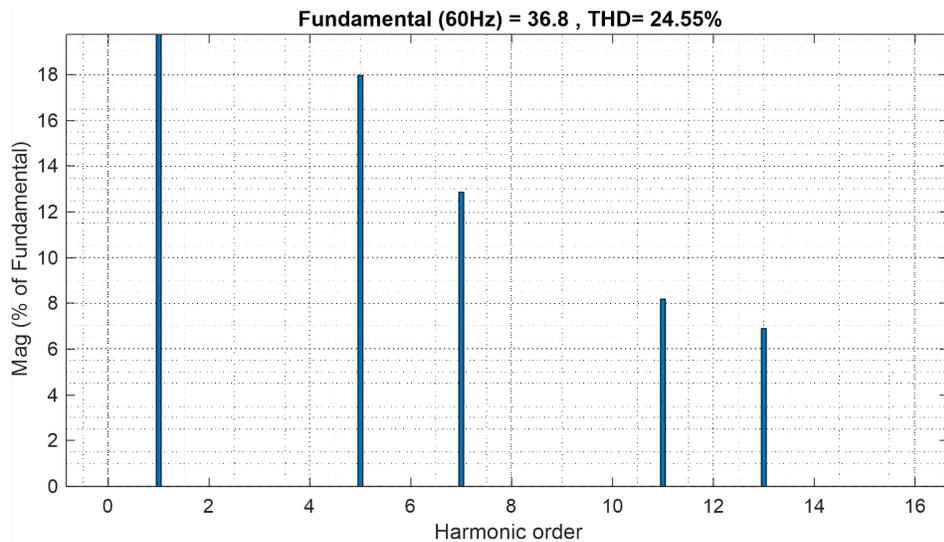


Figura 29. THD de la red sin implementacion del sistema BESS con 30 A de requerimento de carga.

4.3.2. Segundo escenario de prueba

En el segundo escenario de prueba, se lleva a cabo una variación en la capacidad nominal de la batería, manteniendo una demanda de carga de 5 A como referencia. A medida que se incrementa la capacidad nominal de la batería, se observa un ligero aumento en la distorsión armónica total.

Los casos de prueba realizados, como se observa en la **Tabla 5**, muestran que independientemente de la capacidad nominal de la batería, la distorsión armónica se mantiene en un rango cercano y la magnitud de la componente fundamental permanece constante. Por ende, se determina que la capacidad nominal no influye de manera significativa en la mitigación de armónicos.

El THD se mantiene en el rango de 5.5% a 5.7% y al igual que en el primer caso de prueba, se observa que los armónicos de quinto y séptimo orden son los predominantes en el sistema, lo que demuestra la consistencia de la respuesta independientemente de la capacidad nominal de la batería.

4.4. COMPARACIÓN CON SISTEMA ALTERNATIVO PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

En comparación con el trabajo de Babu et al [19], se utiliza un filtro activo de potencia (APF) con un sistema de almacenamiento basado en un condensador y control con banda de histéresis, obteniendo una diferencia significativa en la distorsión armónica.

ca. En su estudio, el sistema presenta un THD del 28.24 %, con una componente fundamental de 30 A cuando opera sin el APF. Sin embargo, cuando se incorpora el APF al sistema, se logra una corrección de armónicos notable, reduciendo el THD al 3.62 %. Por ende, se evidencia que un sistema de almacenamiento, como un condensador, poseen la capacidad de mitigar armónicos en la red eléctrica mediante la inyección de corrientes en contrafase. Sin embargo, los sistemas BESS presentan la característica de desempeñar tanto la función principal de almacenamiento de energía como la de mitigación de fenómenos de calidad de la potencia, eliminando la necesidad de integrar otro sistema para la corrección de armónicos.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En esta sección, se presentan las conclusiones derivadas de la evaluación del sistema BESS en su interacción con la red eléctrica en presencia de armónicos. Se resaltan los logros y hallazgos significativos que surgieron durante el desarrollo y análisis del sistema, abordando la reducción de la distorsión armónica, el rendimiento del sistema en diversas condiciones y los desafíos tecnológicos presentados en el proceso. Además, se señalan direcciones para investigaciones futuras.

5.1. CONCLUSIONES

Para evaluar el comportamiento del sistema BESS en su interacción con la red eléctrica bajo la influencia de armónicos, se llevó a cabo una amplia revisión bibliográfica, respaldada por fuentes verificadas, como artículos científicos, documentos gubernamentales e informes técnicos. Mediante esta revisión, se logró contrastar la información teórica con los resultados experimentales en los estudios simulados y aplicaciones prácticas, lo que permitió la comparación de diversas estrategias y métodos empleados para la mitigación de fenómenos de calidad de la potencia eléctrica.

A partir de la revisión bibliográfica, se fundamentan diferentes diseños y estrategias, en las cuales se realizan modificaciones con el propósito de lograr la mitigación de armónicos de corriente en la red. Los resultados obtenidos reflejan una notoria reducción en la distorsión armónica en la red eléctrica, manteniéndose en cercanía a los límites establecidos por la normativa 519 de la IEEE, la cual fija un umbral de referencia del 5% para las cargas típicas en la red. En condiciones de alta demanda, con una carga máxima de 30 A, el sistema ha demostrado su capacidad para reducir la distorsión armónica al 12.24%, destacando su capacidad para mantener un rendimiento aceptable incluso en situaciones de alta demanda.

Tras el segundo caso de prueba, se comprobó que el sistema se mantiene estable ante variaciones en la capacidad nominal de la batería, observándose pequeñas variaciones en la distorsión armónica y la magnitud de la corriente. Por ende, el sistema mantiene un rendimiento constante, independientemente de la capacidad nominal de la batería.

El proceso de simulación se encuentra con diversos desafíos, principalmente vinculados a las restricciones de capacidad de hardware al prolongar la duración de las simulaciones empleando la extensión de Simulink en el entorno propor-

cionado por el software Matlab. Las restricciones tecnológicas influyen en la obtención de resultados, ya que no permiten una representación precisa del comportamiento del sistema durante escenarios de prueba con un extenso período de tiempo. No obstante, es esencial destacar que se obtienen resultados concretos en la reducción de la distorsión armónica, lo que respalda la eficacia de la simulación y su capacidad de validación en un contexto experimental, ya sea en un entorno de laboratorio o como parte de una planta piloto.

El sistema desarrollado cumple con el objetivo propuesto en este trabajo de investigación al reducir la distorsión armónica en la red eléctrica. Además, se ha demostrado su potencial para mejorar la calidad de la potencia eléctrica en la región de impacto del proyecto marco.

5.2. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO

Dado el creciente interés en mejorar la calidad de la potencia eléctrica, se proyecta que futuras investigaciones se centren en la implementación de estrategias que aborden diversos fenómenos relacionados con la calidad de la potencia. Una de las teorías destacadas en esta área es la teoría de potencia de Akagi, que permite abordar de manera conjunta tanto la mitigación de armónicos como la reducción de reactivos. La implementación de esta teoría ofrece la ventaja de optimizar el uso de los sistemas de almacenamiento de energía (BESS) como servicio auxiliar.

Un trabajo futuro implica llevar a cabo la implementación experimental de esta estrategia utilizando una tarjeta de desarrollo. Dado que se trata de una estrategia con un procesamiento de señales relativamente simple, sería factible emplear un microcontrolador de gama media para llevar a cabo este propósito. Este enfoque experimental permitirá validar y optimizar aún más la eficacia de la estrategia en situaciones prácticas, contribuyendo así a su aplicación en escenarios reales.

Finalmente, basándose en el sistema desarrollado, se busca explorar estrategias que consideren las condiciones ambientales, el estado de salud de la batería y otros fenómenos que puedan afectar el sistema, lo que a su vez altera los resultados en la mitigación de los fenómenos de calidad de la potencia. Lo anterior implica el desarrollo de diversas técnicas de control y gestión de la potencia, las cuales buscan optimizar el rendimiento del sistema y ajustarse eficazmente a las cambiantes condiciones del entorno, así como a la variabilidad en la calidad de la potencia eléctrica.

5.3. PRODUCTOS DESARROLLADOS

Como resultado del desarrollo del proyecto, se ha generado un artículo de investigación titulado *“Compensación de Armónicos a partir de Sistemas de Almacenamiento*

con Baterías“. El trabajo de investigación se presenta en el Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL 2023, organizado por la Universidad Nacional de Colombia. La oportunidad permite compartir los hallazgos e investigaciones con la comunidad académica y científica a nivel global, fomentando así el intercambio de conocimientos y la discusión de estrategias innovadoras destinadas a mejorar la calidad de la energía eléctrica. La presentación en el marco de este evento representa un logro significativo en la difusión y el impacto de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Xu, Z. Miao, L. Fan y G. Gurlaskie, “Unbalance and harmonic mitigation using battery inverters,” Institute of Electrical y Electronics Engineers Inc., nov. de 2015, ISBN: 9781467373890. DOI: 10.1109/NAPS.2015.7335119.
- [2] I. I. E. Agency, “CO2 emissions from fuel combustion 2019 - Highlights.” [En línea]. Disponible en: www.iea.org/t&c/.
- [3] A. I. de Energías Renovables, *Transformación energética mundial: hoja de ruta hasta 2050, Resumen Ejecutivo*. 2018, ISBN: 9789292600594. [En línea]. Disponible en: www.irena.org.
- [4] I. R. E. Agency, *RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2023 STATISTIQUES DE CAPACITÉ RENOUVELABLE 2023 ESTADÍSTICAS DE CAPACIDAD RENOVABLE 2023 About IRENA*. 2023, ISBN: 978-92-9260-525-4. [En línea]. Disponible en: www.irena.org.
- [5] “World Bank Open Data.” (2023), [En línea]. Disponible en: <https://data.worldbank.org>.
- [6] “Análisis del tamaño y participación del mercado de energía renovable en Colombia - Informe de investigación de la industria - Tendencias de crecimiento.” (2023), [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/colombia-renewable-energy-market>.
- [7] N. A. García, D. Alejandro, O. Urrea et al., *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*, 2021.
- [8] I. P. E. Society, I. of Electrical y E. Engineers, *Proceedings of 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) : Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 16-19 October 2016 : conference venue: OURO MINAS PALACE HOTEL, Belo Horizonte - MG - Brazil*, ISBN: 9781509037926.
- [9] I. P. E. Society, I. of Electrical y E. Engineers, *Proceedings of 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) : Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 16-19 October 2016 : conference venue: OURO MINAS PALACE HOTEL, Belo Horizonte - MG - Brazil*, ISBN: 9781509037926.
- [10] D. L. Vida, *“POR EL CUAL SE EXPIDE EL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2022-2026 ÇOLOMBIA POTENCIA MUNDIAL*.
- [11] L. Rocío, A. Ríos y S. C. Escobar, “Energías renovables no convencionales en Colombia y su proyección para el año 2030.” [En línea]. Disponible en: www.udea.edu.co.

- [12] A. M. B. Castañeda, J. Meyer, F. A. Pavas, C. A. Garzón, M. F. Romero y P. Schegner, "Harmonic distortion in public low-voltage grids Comparison of the situation in Colombia and Germany," *Ingeniería e Investigación*, vol. 35, págs. 50-57, 1 Sup nov. de 2015, ISSN: 2248-8723. DOI: 10.15446/ing.investig.v35n1Sup.53286.
- [13] L. E. Gallego, H Torres, F. A. Pavas, D. F. Urrutia, G. A. Cajamarca y D Rondón, *A Methodological Proposal for Monitoring, Analyzing and Estimating Power Quality Indices: the case of Bogotá-Colombia*.
- [14] "CONVOCATORIA DE LA ASIGNACIÓN PARA LA CTeI-AMBIENTAL DEL SGR PARA LA CONFORMACIÓN DE UN LISTADO DE PROPUESTAS DE PROYECTO ELEGIBLES DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN PARA EL AMBIENTE Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL PAÍS."
- [15] J. D. A. Lozano, "PROYECTO FIN DE CARRERA."
- [16] G. Oriti y A. L. Julian, "Reactive Power Control with an Energy Management System in Single Phase AC Microgrids."
- [17] P. Dey, M. M. A. Chowdhury, P. Roy y T. Aziz, "Developing a Methodology for Reactive Power Planning in an Industrial Microgrid," *2022 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2022*, 2022. DOI: 10.1109/TENSYP54529.2022.9864406.
- [18] M. A. Rajabinezhad, A. G. Baayeh, S. Danyali y J. M. Guerrero, "Application of online empirical mode decomposition and continuous wavelet transform for Power Smoothing in Low-voltage Microgrid with Battery Energy Storage System," Institute of Electrical y Electronics Engineers Inc., feb. de 2021, ISBN: 9780738111971. DOI: 10.1109/PEDSTC52094.2021.9405907.
- [19] R. B. N., V. G. R. M. y S. R. R., "Battery energy integrated active power filter for harmonic compensation and active power injection," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 35, sep. de 2022, ISSN: 22105379. DOI: 10.1016/j.suscom.2022.100664.
- [20] C. Mosca, F. Arrigo, A. Mazza et al., "Mitigation of frequency stability issues in low inertia power systems using synchronous compensators and battery energy storage systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, págs. 3951-3959, 17 sep. de 2019, ISSN: 17518687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.7008.
- [21] H. A. Khan, M. Zuhair y M. Rihan, "Voltage fluctuation mitigation with coordinated OLTC and energy storage control in high PV penetrating distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 208, jul. de 2022, ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107924.

- [22] Q. Fu, A. Hamidi, A. Nasiri, V. Bhavaraju, S. B. Krstic y P. Theisen, "The Role of Energy Storage in a Microgrid Concept: Examining the opportunities and promise of microgrids," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 1, págs. 21-29, 2 2013, ISSN: 23255889. DOI: 10.1109/MELE.2013.2294736.
- [23] S. Energy. "Battery energy storage." (2022), [En línea]. Disponible en: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/storage-solutions/battery-energy-storage.html>.
- [24] X. Chen, Z. Liu, P. Wang et al., "Multi-objective optimization of battery capacity of grid-connected PV-BESS system in hybrid building energy sharing community considering time-of-use tariff," *Applied Energy*, vol. 350, nov. de 2023, ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121727.
- [25] S. Kumar y G. D. Kumar, *A State of the Art STATCON for Instantaneous VAR Compensation and Harmonic Suppression to Enhance Power Quality*.
- [26] S. Pep y C. Alicia, *AGREGACIÓN DE Recursos Energéticos Distribuidos (DER) OBSTÁCULOS Y RECOMENDACIONES PARA UN DESARROLLO ÍNTEGRO DEL MERCADO*.
- [27] S. Fusagasugá, T. De, G. Facultad, E. Ortiz y E. Sneider, "MACROPROCESO DE APOYO CÓDIGO: AAAR113 PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO VERSIÓN: 3 DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITO- RIO INSTITUCIONAL VIGENCIA: 2017-11-16 PAGINA: 1 de 7 Señores UNI- VERSIDAD DE CUNDINAMARCA BIBLIOTECA Fusagasuga UNIDAD RE- GIONAL TIPO DE DOCUMENTO EI Autor(Es): APELLIDOS COMPLETOS NOMBRES COMPLETOS No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO Pregrado." [En línea]. Dispo- nible en: www.ucundinamarca.edu.co.
- [28] D. C. of the IEEE Power y E. Society, *IEEE Recommended Practice and Re- quirements for Harmonic Control in Electric Power Systems Sponsored by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society*.
- [29] I. P. E. Society, I. I. A. Society, I. of Electrical y E. Engineers, *2019 IEEE PES International Conference on Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT 2019) : May 21-24, 2019, Chengdu, China*, ISBN: 9781728135205.
- [30] H. Enrique y R. Cubides, "Aspectos tecnicos y normativos para el monitoreo y medicion de armonicos," vol. 19, págs. 129-146, dic. de 2014.
- [31] Q. C. Zhong, "Harmonic droop controller to reduce the voltage harmonics of inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, págs. 936-945, 3 2013, ISSN: 02780046. DOI: 10.1109/TIE.2012.2189542.

- [32] IEC, *IEC 61000-4-15 INTERNATIONAL STANDARD Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-15: Testing and measurement techniques-Flickermeter-Functional and design specifications Compatibilité électromagnétique (CEM)-Partie 4-15: Techniques de test et de mesure-Flickermètre-Spécifications fonctionnelles et de conception*, 2010.
- [33] I. C. de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), *NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5001 CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA. LÍMITES Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EN PUNTO DE CONEXIÓN COMÚN*, 2008.
- [34] L. C. Barvo, D. A. O. Urrea, L. F. C. Sánchez y J. A. G. V. O. F. V. C. J. C. Giraldo, *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios Superintendente Delegado para Energía y Gas Combustible*, 2021.
- [35] D. Baimel, J. Belikov, J. M. Guerrero e Y. Levron, "Dynamic Modeling of Networks, Microgrids, and Renewable Sources in the dq0 Reference Frame: A Survey," *IEEE Access*, vol. 5, págs. 21 323-21 335, oct. de 2017, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2758523.
- [36] J. A. Mueller y J. W. Kimball, "An Efficient Method of Determining Operating Points of Droop-Controlled Microgrids," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, págs. 1432-1446, 4 dic. de 2017, ISSN: 08858969. DOI: 10.1109/TEC.2017.2719580.
- [37] C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin y J. L. Kirtley, "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: Dq0, Clarke, and Park," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, págs. 2070-2083, 4 dic. de 2019, ISSN: 15580059. DOI: 10.1109/TEC.2019.2941175.
- [38] U. Brawijaya, I. of Electrical, E. E. I. Section. et al., *2020 EECCIS : 2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar : Universitas Brawijaya, Malang, East Java, Indonesia, August 26-28, 2020*, ISBN: 9781728171098.
- [39] K.-A. Tehrani, I. Member, T. Capitaine et al., *Current Control Design with a Fractional-Order PID for a Three-Level Inverter*.
- [40] J. Zhang y L. Guo, "Theory and Design of PID Controller for Nonlinear Uncertain Systems," *IEEE Control Systems Letters*, vol. 3, págs. 643-648, 3 jul. de 2019, ISSN: 24751456. DOI: 10.1109/LCSYS.2019.2915306.
- [41] N. Horri, A. H. Boudinar, A. F. Aimer y M. E.-A. Khodja, "Impact of inverter faults on the performances of SPWM and SVPWM control techniques," *Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE)*, nov. de 2023, págs. 1-6. DOI: 10.1109/acemp-optim57845.2023.10287072.

- [42] U. P. Bucuresti, I. P. E. Society, I. of Electrical y E. Engineers, *Proceedings of 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) : University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, 25-28 May 2014*, pág. 936, ISBN: 9781467364874.
- [43] M. A. M. Vargas, *CARACTERIZACIÓN DE UN INVERSOR MULTINIVEL SVPWM DE LAZO CERRADO*, dic. de 2011.
- [44] Y. SOLBAKKEN, *Space Vector PWM Intro — Switchcraft*, mayo de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.switchcraft.org/learning/2017/3/15/space-vector-pwm-intro>.
- [45] M. Ovaskainen, J. Öörni y A. Leinonen, *Real time control advantages in micro-grid applications to ensure grid power quality and stability*.
- [46] A. E. W. H. Kahlane, L. Hassaine y M. Kherchi, “LCL Filter Design for photovoltaic grid connected systems,” *The Journal of Renewable Energies (Revue des Energies Renouvelables)*, vol. 14, P.227-P.232, 1 sep. de 2014, ISSN: 1112-2242.
- [47] A. S. A. Hasim, Z Ibrahim, M. H. N. Talib, S. N. M. Isa, J. M. Lazi y N. M. Yakop, “Photovoltaic System Connected to Three Phase Grid Connected System Incorporating With Active Power Filter,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 6, págs. 345-353, 7 2012, ISSN: 1991-8178.
- [48] L. Chem. “Batería Ion de Litio LG RESU7H.” (), [En línea]. Disponible en: www.tecnosolab.com.