



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Análisis y Simulación en tiempo real de una
Microrred eléctrica inteligente basada en
Energías Renovables para la integración de
Potencia Activa en Redes de Distribución**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Roberto Emmanuel Martínez Vega

DIRECTORA DE TESIS

Dra Nadia María Salgado Herrera

Temixco, Mor., a 13 de diciembre de 2023



IER
Instituto de Energías
Renovables



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**



**ENES
JURIQUILLA**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

OF/IER/LIER/155/2023
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente

Por medio de la presente le informo que el día miércoles 13 de diciembre de 2023, a las 09:30 h, en el Instituto de Energías Renovables, el **C. ROBERTO EMMANUEL MARTÍNEZ VEGA**, con número de cuenta 316155104 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación de su trabajo de titulación y examen profesional titulado:

“Análisis y simulación en tiempo real de una microrred eléctrica inteligente basada en energías renovables para la integración de potencia activa en redes de distribución”

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE: DR. MIGUEL ROBLES PÉREZ
VOCAL: DR. DAVID GRANADOS LIEBERMAN
SECRETARIA: DRA. NADIA MARÍA SALGADO HERRERA
SUPLENTE: MTRA. TERESA YADIRA PULIDO ARREOLA
SUPLENTE: DR. JORGE ALEJANDRO WONG LOYA

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 6 de diciembre de 2023



Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp.



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi madre, que siempre estuvo respaldándome en mis decisiones aunque no le gusten, a mi cómplice de travesuras mi nene y mi nana, a mi sobrino y mi nuevo amor llamado Emilio, que aunque con unos pocos meses de vida me ha robado suspiros de amor, a mi compañero de sillón Néstor, con el que no solamente procrastine en la universidad, sino también en la realización de este trabajo y mi compadre y compañero de vida mi primo, no dejando a un lado a mis tíos Manuel y Lulú con los que sé que se puede contar y a mis perros, con los que cada fin de semana de regreso a la CDMX, me recibían con emoción y gusto de volvernos a ver.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios, que me permitió poder concluir una etapa de mi vida, con este trabajo. De igual forma quiero agradecer a mi mamá que me dio las herramientas necesarias, como el darme una casa para que pudiera moverme de Ciudad y poder vivir una vida universitaria agusto y cómoda, a la par a todas las personas que contribuyeron, directa e indirectamente conmigo en la universidad, a mi hermana Vane, mi nana Hilda y a mis amigos Julio, que estuvo para apoyarme no solamente con su amistad, a Ale, Monse, Jessi, Gerry, Benja, Jorge y Sabrina con los que no solamente compartí un salón de clases, si no grandes aventuras, risas, llantos, partidos de futbol, entre otras cosas, como subir en diablitos una pendiente prolongada, irse de campamento para celebrar algún cumpleaños, subí cerros o simplemente compartir el gusto de comer ciruelas o ir por enchiladas. Agradecer a mi tutora la Dra. Nadia, que siempre estuvo al pendiente de mi progreso con este trabajo y por brindarme de su tiempo para enseñarme a usar el Opal, entre otras cosas místicas de la electrónica de potencia, de igual forma a todos los profesores que tuve en mi carrera universitaria, que con sus consejos y clases, puedo ahora concluir con esta etapa.

Resumen

Promover el desarrollo de generación distribuida por fuentes renovables, no solo satisface la demanda eléctrica, si no que ayuda a la transición energética descentralizada. Este trabajo de tesis presenta una estrategia de interconexión de una microrred para la integración de potencia activa en redes eléctricas de distribución.

La generación distribuida depende de la creación de accesos de energía renovable interconectados en puntos de acoplamiento común de los diferentes niveles de voltaje de las redes eléctricas, a través de los cuales se propicia la formación de una microrred. Entonces, el principal escenario que presenta una microrred es la interconexión de fuentes de energías renovables con naturaleza de generación variable y/o estocástica, tales como, los sistemas de conversión de energía eólica, los sistemas de conversión de energía solar y los sistemas de almacenamiento de energía por baterías. Para ello, se aborda el cumplimiento del código de red 2.0 en México para la interconexión de plantas de generación distribuida menores a 0.5 MVA, en redes de 1 a 13.8 kV, acatando índices técnicos como: i) factor de potencia y/o regulación Volt/VAR; ii) distorsión armónica de corriente y iii) desbalances y soporte de variación de voltaje.

Finalmente, el escenario de estudio y validación se genera a través del modelo matemático completo y se corrobora por los resultados de simulación en MATLAB-Simulink®, mediante la metodología Software In the loop y el simulador en tiempo real Opal-RT Technologies®, proporcionando un entorno de simulación virtual para el desarrollo y prueba de estrategias de control detalladas, indicando una compensación de voltaje del enlace de CD e inyección de potencia en redes de distribución con una eficiencia del 95 %.

Acrónimos

- **AIE** Agencia Internacional de Energía.
- **BESS** Sistema de Almacenamiento de Energía por Baterías (Battery Energy Storage Systems).
- **CA** Corriente Alterna.
- **CD** Corriente Directa.
- **CENACE** Centro Nacional de Control de Energía.
- **CFE** Comisión Federal de Electricidad.
- **CRE** Comisión Reguladora de Energía.
- **FER** Fuentes de Energía Renovable.
- **GD** Generación Distribuida.
- **INEEL** Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.
- **IRENA** Agencia Internacional de Energías Renovables (International Renewable Energy Agency).
- **MEM** Mercado Eléctrico Mayorista.
- **ODS** Objetivo de Desarrollo Sustentable.
- **ONU** Organización de las Naciones Unidas.
- **PCC** Punto de Acoplamiento Común (Point Coupling Common).
- **PMSG** Generador Síncrono de Imanes Permanentes (Permanent Magnet Synchronous Generator).
- **RED** Recursos de Energía Distribuida.
- **RTDS** Simulador Digital en Tiempo Real (Real Time Digital Simulator).
- **SEA** Sistemas de Almacenamiento de Energía.
- **SCEE** Sistema de Conversión de Energía Eólica.
- **SEN** Sistema Eléctrico Nacional.
- **SENER** Secretaría de Energía.
- **SCES** Sistema de Conversión de Energía Solar.
- **THD** Distorsión Armónica Total (Total Harmonic Distortion).
- **VSC** Convertidor de Fuente de Voltaje (Voltage Source Converter).

Nomenclatura

- **D** Ciclo de Servicio.
- **v** Velocidad del Viento.
- **C_p** Coeficiente de Potencia
- **λ** Velocidad en la punta del aspa.
- **β** Ángulo de Ataque.
- **R** Radio del Rotor.
- **ρ** Densidad.
- **T_e** Torque Electromecánico.
- **T_m** Torque Mecánico.
- **P_m** Potencia Mecánica.
- **N_{TM}** Número Total de Módulos.
- **N_{MS}** Número Total de Módulos en Serie.
- **N_{MP}** Número Total de Módulos en Paralelo.
- **V_{in}** Voltaje de Entrada.
- **V_{out}** Voltaje de Salida.
- **V_{DC}** Voltaje de Corriente Directa.
- **V_g** Voltaje de la red.
- **V_t** Voltaje trifásico.
- **V_R** Voltaje en la Resistencia.
- **V_L** Voltaje en la Inductancia.

- G Irradiancia Solar.
- V_{bat} Voltaje de la Batería.
- P_{total} Potencia Total.
- P_{SCEE} Potencia del SCEE.
- P_{SCES} Potencia del SCES.
- P_{BESS} Potencia del BESS.
- \vec{L}_{abc} Componente inductivo.
- ζ Tasa de descarga.
- m Índice de modulación.
- ω Frecuencia angular de la red.
- abc Señales trifásicas.
- $dq0$ Señales en el marco de referencia dq0.
- \vec{V}_{dq0} Voltaje en el marco de referencia dq0.
- i_{dq0} Corriente en el marco de referencia dq0.
- P_{sref} Potencia de referencia Activa.
- Q_{sref} Potencia de referencia Reactiva.
- kp Constante Proporcional.
- ki Constante Integral.
- η^d Eficiencia de Descarga.
- η^c Eficiencia de Carga.

Índice

1. Introducción	9
1.1. Concepto general de una microrred eléctrica inteligente.	9
1.2. Planteamiento del Problema.	13
1.3. Hipótesis	14
1.4. Propuesta de Investigación	14
1.5. Objetivos	15
1.5.1. General	15
1.5.2. Específicos	15
1.6. Justificación	15
1.7. Metodología	16
1.8. Organización de la Tesis	16
2. Estado del Arte	18
2.1. Microrred eléctrica inteligente en el mundo	18
2.2. Microrred eléctrica inteligente en México	21
2.3. Capacidad propuesta en microrred eléctrica inteligente	24
3. Modelado de la microrred eléctrica inteligente	25
3.1. Sistema de conversión de energía eólica	25
3.1.1. Configuración del Sistema de Conversión de Energía Eólica	27
3.2. Sistema de conversión de energía fotovoltaica	27
3.2.1. Dimensionamiento del Arreglo Fotovoltaico.	30
3.2.2. Convertidor elevador CD/CD	30
3.2.3. Configuración del Sistema de Conversión de Energía Solar.	31
3.3. Sistema de almacenamiento de energía por medio de Baterías	32
3.3.1. Configuración del Sistema de Almacenamiento de Energía por medio de Baterías.	34
3.4. Unidad de generación	34
3.4.1. Modelado y configuración de una microrred utilizando la metodología Software In Loop SIL.	34

3.4.2. Convertidor de electrónica de Potencia de CD-CA trifásico - Voltage Source Converter (VSC)	36
4. Integración de potencia activa en redes de distribución	40
4.1. Resultados de la integración de potencia activa en redes de distribución ocupando Matlab-Simulink	40
4.2. Resultados de la integración de potencia activa en redes de distribución ocupando Opal-RT Technologies	43
5. Conclusiones	49
6. Financiamiento	49

1 Introducción

1.1 Concepto general de una microrred eléctrica inteligente.

El cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta actualmente la humanidad. Se refiere al aumento de la temperatura promedio global debido a la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono, producido por la actividad humana. Este aumento de la temperatura tiene efectos significativos en el clima, el medio ambiente y la vida en el planeta, como el aumento del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares, la acidificación del océano, la desertificación y la pérdida de biodiversidad. La lucha contra el cambio climático es un esfuerzo global que requiere la cooperación de todos para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y proteger nuestro hogar común [1].

Para poder confrontar este problema se han buscado hacer acciones sostenibles, un ejemplo claro y quizás el más importante, lo encontramos en los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), estos objetivos los da la Organización de la Naciones Unidas (ONU) para tener un futuro mas sostenible y son propuestos para los países en desarrollo como para países desarrollados [2].

El séptimo ODS menciona que se debe de garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Lo que motiva a que se realicen investigaciones para poder tener una red de energía eléctrica segura que permita dar por sentado que se tendrá un suministro de energía continuo e ininterrumpido. Además, una red eléctrica segura y confiable es esencial para el funcionamiento de tecnologías críticas, como los sistemas de salud, los sistemas de comunicaciones, los sistemas de seguridad y los sistemas de control de procesos industriales [3],[4], [5].

El consumo irresponsable de energía es uno de los principales desafíos que enfrentamos para lograr un futuro sostenible y reducir nuestra huella de carbono. A medida que evoluciona la tecnología, se van teniendo nuevos comportamientos en el consumo de la energía, lo que provoca que la red eléctrica, tenga operaciones con un aumento en su complejidad [6].

El doceavo ODS, se refiere al objetivo de "Producción y Consumo Responsables". Este objetivo busca fomentar prácticas más sostenibles en la producción y el consumo de bienes y servicios [7]. Ya que en

los últimos años el consumo de la energía en los sectores ha tenido un aumento, el consumo doméstico y la industria de servicios de energía han crecido a tal grado de compararse al uso de energía en la minería. La incertidumbre del nuevo comportamiento trae consigo problemas en la planificación de la red eléctrica; ya que, el consumo total de energía de los usuarios traerá fluctuaciones al consumo total de energía en las diferentes sectores de consumo de una sociedad [8].

Una de las opciones para poder contrarrestar la congestión en la red debido al nuevo comportamiento de consumo de energía es, la descentralización de la generación de energía. Que permite la armonización del suministro y la carga de energía. Abriendo un mercado a la instalación de nueva tecnología para la generación de energía [9].

La Agencia Internacional de Energía (AIE), en su informe "World Energy Outlook 2021", da a conocer que la generación mundial de energía en 2020 fue 168.8 petavatios hora (PWh), la disminución del 3.5 % se debe a causa de la pandemia del virus SRAS-CoV-2. De esa cantidad, el 64.6 % provino de fuentes fósiles (carbón, petróleo y gas), el 25.5 % de fuentes renovables (hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, biomasa y residuos) y el 9.9 % de energía nuclear. En cuanto a la distribución geográfica, Asia Pacífico es la región que más energía generó en 2020, con el 46.1 % de la generación mundial, seguida por América del Norte (19.3 %), Europa (17.9 %), Medio Oriente (8.1 %), América Latina (6.2 %) y África (2.3 %) [10].

A su vez dan a conocer el reporte de consumo de energía a nivel mundial, que es de 157.5 mil millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe). En términos de sectores, el consumo de energía se distribuyó de la siguiente manera, 37 % en industria, seguido por el transporte con el 32 %, el sector residencial con un 15 %, el sector comercial y público con un 11 % y por último la agricultura y pesca con un 5 % [10].

Sumado a los problemas de suministro de energía, las áreas rurales remotamente ubicadas en varios países, presentan la falta de suministro eléctrico de la red pública, en otras palabras no tienen acceso a este servicio. Dado que las Fuentes de Energía Renovable (FER) suelen estar dispersas, la Generación Distribuida (GD) se convierte en una solución atractiva para satisfacer la demanda de energía en dichas áreas. Al conectar GD (por ejemplo, energía solar, eólica, celda de combustible, etc.) con cargas locales y almacenamiento de energía, se forma una micro red [11].

Una microrred se define, según el Departamento de Energía de los EE. UU., como un grupo de cargas, micro-fuentes y recursos de energía distribuida con límites eléctricos claramente definidos capaz de autoabastecerse y operar de manera autónoma de la red de distribución con el fin de asegurar la continuidad del suministro eléctrico con un alto factor de confiabilidad [12].

Otros autores definen a una microrred, como un grupo de Recursos de Energía Distribuida (RED), incluidas las FER y los sistemas de almacenamiento de energía (BESS, por sus siglas en inglés: Battery Energy Storage System), además de las cargas que operan localmente como una sola entidad controlable. Las microrredes se pueden encontrar en rangos operativos de baja y media tensión, típicamente de 400 V a 69 kV. Además, existen en varios tamaños. Pueden ser redes grandes y complejas, de hasta decenas de MW, con varios recursos de generación y unidades de almacenamiento que atienden múltiples cargas [12], [13].

Por otro lado, las microrredes también pueden ser sistemas pequeños y simples, en el rango de cientos de kW, abasteciendo a unos pocos clientes. En pocas palabras, una microrred es una versión en miniatura del modelo de energía sostenible que se puede utilizar para generar, distribuir y controlar el flujo de energía bidireccional dentro de sus límites de operación de manera coordinada, inteligente y eficiente, con un enfoque en la integración de las energías renovables [13].

Las microrredes tienen dos modos, uno es conectado a la red mientras que el otro es modo isla. El modo isla están diseñado para operar fuera de la red, es el más destacado, ya que presenta menos fluctuaciones de voltaje y de potencia. Sin embargo, el modo interconectado a la red, permite que sea más flexible, porque también puede tomar energía de la red a la que esta conectada [12], [14].

Algunos autores añadirían un tercer modo, este sería híbrido, en esté la microrred se conecta y se desconecta de la red eléctrica. El sistema de microrred ingresa al modo de operación fuera de la red mientras falla la red eléctrica, y el sistema de microrred se integra nuevamente a la red eléctrica a través de un punto común de acoplamiento (PCC, por sus siglas en inglés: Point Coupling Common), cuando la red eléctrica reanuda el suministro de energía normal [15]. Las microrredes eléctricas inteligentes son capaces de poder cuantificar en tiempo real datos de consumo y producción de electricidad [16].

Las microrredes son una tecnología que empieza a tomar fuerza en el mercado, ya que entre sus ventajas se encuentra el aumento en la confiabilidad de la energía, la actualización y soporte de la infraes-

estructura cuanto existen las interrupciones del suministro de energía [17]. La discontinuidad de la energía no solo se dan por gestión y operación de las redes eléctricas, si no también se presentan problemas por el clima, desastres naturales, ciberataques o terrorismo. A consecuencia de los eventos ocasionados por el clima, Estados Unidos, ha tenido una pérdida económica anual de entre 25 a 75 mil millones de dólares. Por otro lado en 2014 Estados Unidos tuvo un ataque de terrorismo en la subestación de transmisión Metcalf de PG&E, en el estado de California [4]. La temporada de huracanes en el 2008 en China dejó casi tres millones de interrupciones en el año. El mismo año pero al sur de China se tuvo una tormenta de nieve que ocasionó 124 mil interrupciones en las líneas de distribución [18].

Debido a los nuevos retos de eventos destructivos que se presenta en las redes eléctricas, se busca que las microrredes puedan ser una opción de confiabilidad y de resiliencia, aunque son dos conceptos relacionados, los sistemas de análisis para cada uno de ellos es distinto. El concepto de confiabilidad, se define de la siguiente manera:

”La confiabilidad está asociada con la ocurrencia de eventos que tienen una alta probabilidad pero un efecto menor.” [19]

Los análisis de confiabilidad se basan en tener un número limitados de eventos de interrupción para monitorear las operaciones de la red en condiciones normales [4]. Por otro lado la resiliencia es definida por el Laboratorio Nacional Sandia de la siguiente manera:

”El término resiliencia significa la capacidad de prepararse y adaptarse a las condiciones cambiantes y resistir y recuperarse rápidamente de las interrupciones. La resiliencia incluye la capacidad de resistir y recuperarse de ataques deliberados, accidentes o amenazas o incidentes que ocurren naturalmente”. [4]

El departamento de energía de los Estados Unidos, ha seleccionado seis categorías de métricas para evaluar la modernización de la red eléctrica, las cuales son: fiabilidad, flexibilidad, sostenibilidad, asequibilidad, seguridad y resiliencia, las microrredes cumplen las evaluaciones en las métricas [4].

La resiliencia de la microrredes permite crear planes en caso de eventos, cubren desde la preparación antes, durante y después del desastre, buscando la pronta recuperación y restauración de la red eléctrica, a la par tienen como objetivo minimizar los daños causados por el evento y buscar cubrir pronto la de-

manda da la carga que cuenta la red [19].

El concepto de resiliencia permite tener cuatro características que fortalecen al sistema eléctrico, anticipación, absorción, recuperación y adaptabilidad después de los eventos [18]. Una microrred resiliente busca volver al equilibrio en un tiempo mas corto. A la par tienen como objetivo minimizar los daños causados por el evento, la resiliencia será más alta si el sistema puede resistir mejor los desastres. En la etapa de recuperación también será un indicador de la resiliencia del sistema, ya que a mayor restauración de la red, mayor resiliencia [19].

En un sistema con microrredes, estas toman el rol de abastecer de energía a las cargas locales, les dan la capacidad de sobrevivir las cargas críticas durante el evento, mejorando así el desempeño del sistema cuando se presenta un evento [18].

Datos proporcionados en el reporte "Microrredes para la transición energética" de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés: International Renewable Energy Agency), indica que el número de microrredes en todo el mundo había alcanzado los 6.800 sistemas en 2019, con una capacidad instalada total de alrededor de 13 gigavatios (GW). Este informe también indica que se espera que el número de microrredes siga creciendo, especialmente en países en desarrollo, y que la capacidad instalada se multiplique por cuatro para 2030, llegando a los 52 GW [20].

Otro reporte dado por AIE en el 2020 da a conocer uno de los ejemplos destacados de esta tecnología, esté se encuentra en la Isla de Ta'u Samoa Americana, que utiliza energía solar y almacenamiento de baterías para proporcionar energía renovable y confiable a la isla. El informe también menciona el proyecto de microrred en la isla de Kodiak, Alaska, que utiliza una combinación de energía eólica, hidroeléctrica y diésel para garantizar un suministro de energía confiable a la isla [21].

1.2 Planteamiento del Problema.

La generación distribuida, es una de las herramientas que nos pueden ayudar a realizar una transición energética. Las microrredes eléctricas, son una pieza clave, para poder hacer esta transición y servir de apoyo a la penetración de la generación distribuida. Sin embargo, en la actualidad las microrredes eléctricas híbridas de CA/CD, han presentado problemas al momento de interconectarse a la red eléctrica en el desequilibrio de voltaje en la subred de CA, lo que a su vez perjudica la calidad de la energía. Esto provoca que se presente estrés en la operación del convertidor de interfaz de subred de CD/CA y distorsiona la calidad del voltaje de la subred de CD [11],[14].

Otros problemas que se presentan son la sincronización, protección, estabilidad, interferencia electromagnética y la compatibilidad de los sistemas. La inclusión de las microrredes genera una complejidad en los intereses y obstaculiza la garantía de la seguridad en la operación del sistema, lo que presenta nuevos retos en la programación de la optimización del sistema de energía [22].

Los valores de desbalance máximo de tensión, que se puede tener en una microrred, es de 3%. Por lo que hace que es necesario buscar herramientas para que estas fluctuaciones de tensión sean menores o nulas. Los controladores y/o acondicionadores son herramientas que se han desarrollado para contrarrestar los inconvenientes de la calidad de la energía [12], [23]. En la literatura se han propuesto varios controladores de voltaje, que han ayudado a mejorar el perfil de voltaje en las microrredes [14].

1.3 Hipótesis

Los sistemas de conversión de energía solar y eólica, son variables, lo que lleva a que se presenten problemas en la calidad de energía entregada. Para este trabajo se, busca mitigar estos problemas. Manteniendo el voltaje constante en el enlace de CD, permitirá, que las fluctuaciones en el PCC, disminuyan o se eliminen.

Mediante un solo controlador proporcional-integral (PI), ayudará a darle seguimiento al voltaje de CD, se podrá eliminar las variaciones que presente el sistema y así poder entregar un voltaje constante en el enlace de CD.

1.4 Propuesta de Investigación

En este trabajo de tesis se propone el análisis de integración de potencia activa en redes de distribución, mediante sistemas de conversión de energía eólica y fotovoltaica, además, se interconecta un sistema de almacenamiento de energía por baterías generando el panorama de una microrred eléctrica inteligente. Para verificar la funcionalidad de la metodología del sistema híbrido propuesto se propone un análisis matemático, una simulación en Matlab-Simulink y una validación en tiempo real a través de la plataforma Opal-RT Technologies, integrando una potencia activa de 30kW para el SCEE, 30kW para el SCEFV y el BESS es de 15kW; manteniendo un enlace de CD de 660V.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Proponer, analizar, modelar, diseñar, simular y validar dispositivos convertidores de electrónica de potencia para la interconexión de SCEE y SCES, que satisfagan las demandas de integración de potencia activa en redes de distribución; además, se incorpora un BESS atendiendo al panorama de una microrred eléctrica inteligente.

1.5.2 Específicos

- Proponer, analizar y modelar el arreglo de la microrred, la cual consta de un sistema de conversión de energía fotovoltaica, otro de energía eólica y un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías.
- Diseñar los dispositivos de convertidores de electrónica de potencia para transferir 30kW para el SCEE, 30kW para el SCEFV y 15kW para el BESS; manteniendo un enlace de CD constante de 660V, tomando cualquiera de las fuentes de energía.
- Simular mediante Matlab-Simulink y Validar en tiempo real con el equipo de Opal-RT Technologies , el funcionamiento de la microrred propuesta.

1.6 Justificación

La variabilidad de las fuentes de energía renovable hacen que la red presente fenómenos adversos de la calidad de la energía, tales como: desbalances de voltaje, frecuencia y aumento del THD, poniendo a la red de distribución en un punto donde reduce la calidad de la energía que entrega al consumidor.

Las microrredes, son una herramienta para que la GD pueda llevarse a cabo, sin embargo, presenta problemas en la interconexión a la red. Es por eso que, con la integración de potencia activa mediante el diseño correcto de dispositivos de electrónica de potencia para convertir la energía de CD/CA y/o CA/CD. Por lo tanto, el tener dos sistemas de conversión de energía y uno sistema de almacenamiento, se mantendrá el punto de acoplamiento común sin perturbaciones y con bajo THD.

1.7 Metodología

La metodología consta de las siguientes partes: Estudio del estado del arte, modelado, simulación de la microrred, validación en tiempo real, resultados y conclusiones.

El estudio del estado del arte, se lleva a cabo con la búsqueda literaria, especializada en las microrredes para la interconexión a la red de distribución, se incluyen documentos de casos de estudio donde se presentan fenómenos adversos de calidad de la energía, problemas de interconexión a la red, medidas de seguridad para garantizar el buen funcionamiento y casos de éxito de microrredes. Esto con el fin de conocer las tendencias e innovaciones recientes.

En la parte de modelado y simulación, se apoya en el software Matlab-Simulink, para crear los tres elementos que componen la microrred, el SCEFV, SCEE y el BESS. Lo que nos permitirá que de forma independiente podamos evaluar la metodología propuesta. Posteriormente, se añadirán datos de corrientes para cada uno de los elementos de la microrred.

En la etapa de validación en tiempo real se mantendrán las condiciones de potencia en cada uno de los elementos. Para esta etapa se ocupará el software y hardware de Opal-RT Technologies.

Por último, se presentan los resultados de la validación en tiempo real, se dan unas conclusiones de los mismos, basándose en la revisión bibliográfica y se proponen trabajos a futuro para la continuidad del panorama de una microrred eléctrica inteligente.

1.8 Organización de la Tesis

Esta tesis estará estructurada por cinco capítulos, los cuales se describen en los siguientes apartados.

En el primer capítulo se abordarán los antecedentes, conceptos básicos de la micro-redes, problemática, hipótesis, propuesta de investigación, objetivos, justificación y metodología.

El segundo capítulo se revisará el estado del arte correspondiente a las micro redes inteligentes en el mundo y particularmente las que se encuentran en México.

En el tercer capítulo se realiza el modelado de cada uno de los elementos con los que contará la

microrred, a la par se modelarán y darán datos de corrientes de cada uno.

El cuarto capítulo se presentan la simulación en tiempo real y los resultados de la integración de potencia activa en redes de distribución. Se muestra el análisis de eficiencia, donde se toma la entrada/salida de potencia, de la microrred.

En el quinto capítulo se establecen conclusiones generales. Así mismo, se proponen recomendaciones para trabajos futuros.

2 Estado del Arte

Durante la última década la crisis energética y la contaminación ambiental, se han convertido en grandes retos para un desarrollo sostenible, a su vez, se busca transicionar, a un escenario donde la generación de energía sea totalmente renovable. Lo que ha hecho que el estudio sobre el uso eficiente de los recursos energéticos renovables distribuidos y el transporte bajo en carbono sea un tópico de interés en la investigación. La generación de energía local se establece en áreas industriales, formando así, microrredes que operan en modo isla o en modo conectados a la red [24], [25].

La tecnología como las microrredes pueden integrar de manera efectiva las diversas fuentes de energía renovable distribuidas, como la solar, la eólica, la biomasa y las baterías de almacenamiento. Esto fomenta la GD, ya que hay lugares donde la accesibilidad y disponibilidad de la red principal no puede llegar, a su vez reduce costos en la infraestructura de la red, cubre la demanda de energía de cargas locales, es por eso que se ha vuelto uno de los temas que llama la atención para desarrollar investigación [23],[24].

Sin embargo, las microrredes presentan problemas al ser conectadas a un red de distribución, como son el desajuste de la potencia reactiva, la inestabilidad del voltaje, efectos de los armónicos, la disminución de la calidad de la energía, fluctuaciones en la frecuencia, que lleva a la desincronización de la microrred con el sistema de distribución y problemas en la protección de la microrred. Los problemas afectan la confiabilidad y la calidad de la energía suministrada a la red, lo que ha hecho que las investigaciones se centren en los controladores de tensión, convertidores de CD/CA, convertidores de potencia para variar los niveles de voltaje CD/CD, inversores de CA/CD entre otros equipos de electrónica de potencia que ayudan a corregir estos problemas [24],[26].

2.1 Microrred eléctrica inteligente en el mundo

De acuerdo al Escenario de 1,5 °C de IRENA, al menos el 90 % de la generación de electricidad debería provenir de fuentes renovables para 2050, frente al 25 % en 2018. Para 2050, las FER, principalmente eólica y solar fotovoltaica, representarán el 63 % de la generación total de electricidad mundial, pasando de sus porcentajes actuales del 7 % y el 3 % al 34 % y el 29 %, respectivamente. [27]. Esto indica que la GD es una de las estrategias donde se puede ayudar a lograr las metas que se han propuesto para la mitad del siguiente siglo. Las microrredes tiene el potencial de resolver los principales

problemas derivados de la gran penetración de la GD en los sistemas de distribución [24].

El departamento de los Estados Unidos, reporta que en 2019, el 86 % de la capacidad instalada de generación de microrredes provino de fuentes de combustibles fósiles, mientras que en 2021 la capacidad instalada prevista será del 16 % de combustibles fósiles. El sistema de suministro eléctrico en los Estados Unidos se está distribuyendo cada vez más, tanto en diseño como en operación, y se está descarbonizando. Las estimaciones sitúan la fracción de generación que se distribuye en un 30-50 % para 2030. Se espera que la generación renovable sea la fuente predominante de generación para 2030 [28]. A finales del 2022, se asignó un presupuesto para la inversión de la red eléctrica, de 10500 millones de dólares, 30 mil son para la resiliencia de la red, el restante está repartido en microrredes y la innovación de la red [29].

En caso de la República popular de China, se espera que para el año 2050 tenga una capacidad de 1,66 TW de energía solar fotovoltaica y 1,33 TW de energía eólica terrestre convirtiéndose en las dos mayores fuentes de capacidad de generación de electricidad. En el 2018 el gobierno de China permitió la entrada al mercado eléctrico minorista a empresas privadas lo que hizo que las microrredes pudieran entrar a cubrir la demanda de pequeñas localidades, ayudando así a la red eléctrica de distribución [16]. En 2023 la empresa State Grid Corporation de China, anunció una inversión 77 mil millones de dólares, sumada a esta la compañía China Southern Power Grid proporcionarán 99 mil millones de dólares, para las líneas de transmisión y distribución [25].

Según datos de la IEA, la GD, ha provocado que países apuesten por pequeñas instalaciones, que a su vez ha resultado como la mayor integración de FER. Australia y algunos países de la Unión Europea (UE), han apostado por la GD, en azoteas, a partir de SCEF. Siendo Australia el país líder de este tipo de GD, con una capacidad que supera los 19GW, dando energía a más de 650 000 hogares. Por otro lado la UE, para el año 2022 añadió 23 GW de SCEF en azoteas. La India tiene el objetivo de alcanzar la capacidad instalada de 500 GW, para el 2030, a partir de GD, basada en las FER, por el momento solo cuenta con 16 GW. Otro país que está en búsqueda de aumentar su GD a partir de SCEF, es Brasil, que ha añadido 7.8 GW en el 2022 para tener un total de 17 GW de capacidad total instalada [30].

Un problema que presentan las microrredes conectadas a la red de distribución es la calidad de la energía; se busca proporcionar voltaje sinusoidal estable y regulado a todos los consumidores, las cargas no lineales inducen armónicos a la red, lo que provoca fluctuaciones en la interconexión [31]. Por consiguiente han propuestos diferentes estrategias para poder ayudar a solucionar el problema. Controladores

de voltaje, controladores en la sincronización previa conectado a la red en el control de caída, convertidores de potencia y entre otros elementos de la electrónica de potencia [16], [31], [15].

En [12], se analizan los problemas de calidad de energía que presenta los BESS, cuando son conectados a la red, especialmente se aborda los problemas que introduce a la red los BESS, como son distorsión armónica y caídas de voltaje.

En [15], se presenta un control de conmutación, que permite conectar la microrred en modo híbrido, este control de conmutación hace que la interconexión entre microrred y la red eléctrica tenga una transición suave, se enfoca a solucionar la corriente de irrupción y el voltaje de impulso durante el cambio de modo de la microrred.

En [32] se exhibe inversores fotovoltaicos inteligentes, que controlan la frecuencia y el voltaje, estos están compuestos con electrónica de potencia. Con ellos se realiza un análisis experimental en áreas de alta y baja inyección fotovoltaica, lo que se busca es mantener en rango nominal al voltaje y la frecuencia.

Por otro lado en [33], se comparan las ventajas y desventajas de convertidores elevadores de voltaje en DC con un ciclo de servicio mas pequeño, donde se juega con el diseño de los elementos que lo componen y se añaden componentes pasivos como inductancias y capacitancias. Dan como resultados un menos estrés de voltaje en los dispositivos, una eficiencia con pocos elementos y configuración mas simple, lo que a la par reduce los costos de fabricación.

Una solución óptima de la configuración de una microrred basada en Eólica-PV-Batería, donde su objetivo es el cálculo del coste anual integrado de potencia y la dependencia de la red se ve en [34]. Por otro lado en [35], los autores proponen un método de optimización basado en el concepto de soft target control, que considerará la naturaleza estocástica de la velocidad del viento para producir energía utilizando un Generador Asíncrono de Imanes Permanentes (PMSG por sus siglas en ingles Permanent Magnet Synchronous Generator).

Todas estas investigaciones son importantes en la evolución y el desarrollo de una microrred. A pesar de eso, ninguno de los trabajos anteriores presenta la interconexión de sistemas Eólico-PV-Batería de forma óptima y eficiente, lo cual es absolutamente necesario, la generación de energía de calidad para llevar a cabo este y otros tipos de estudios.

2.2 Microrred eléctrica inteligente en México

En México existen diferentes instituciones gubernamentales encargadas de una área en específico del sector energético. Particularmente, son delegadas a monitorear, controlar, producir, legislar, operar, regular y más. Las instituciones clave con vinculo directo a la generación de energía en México, son las siguientes.

1. Secretaría de Energía (SENER) es la encargada de legislar la política energética del país, busca, que el suministro sea competitivo, de calidad, sea accesible y ambientalmente sustentable de energéticos que requiere el desarrollo de la vida nacional [36].
2. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) esta coordinado por el SENER, este organismo busca desarrollar, innovar e investigar nuevos procesos, tecnologías, principalmente redes eléctricas, sistemas de potencia, energías renovables y reducción de emisiones [37].
3. Comisión Federal de Electricidad (CFE) es una empresa pública y de carácter social, que se encarga de proveer energía eléctrica a la nación [38].
4. Comisión Reguladora de Energía (CRE) Dependencia encargada de la Administración Pública Federal centralizada, encargada de la gestión de transporte, almacenamiento, distribución, compresión, licuefacción y regasificación, entre otras actividades en materia energética [39].
5. Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) organismo publico cuyo objetivo es gestionar el Sistema Eléctrico Nacional (SEN),a la par opera el el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) [40].

El conocer cada una de las dependencias que están involucradas en el sector energético en México, ayuda a conocer la condiciones en materia energética del país, puede acercarse a la diversificación de la fuentes de energía del país, como es la configuración del SIN, en donde se pueden sacar permisos para poder desarrollar proyectos en materia.

Por lo que hoy en día, México como otros países a nivel mundial, buscan que la producción de energía eléctrica trascienda hacia una mayor aportación con base en las FER, impulsadas por el deseo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y los gases de efecto invernadero. La introducción de FER, conllevan a reducir un problema ambiental, que con el paso del tiempo se volverá económico; para lo cual, en el mundo día a día se trabaja en los distintos escenarios de transición energética. Particularmente

en México, la actual Ley del Servicio Eléctrico abre las puertas al concepto de generación distribuida o generación in-situ, logrando que los usuarios finales generen independencia energética de las grandes centrales[41].

Lo que lleva a que la micro-generación, en su mayoría, usa las FER, esto consecuentemente lleva a mitigar las emisiones de CO₂ [42], representando una opción viable a mediano y largo plazo para la electrificación de sitios descentralizados, buscando siempre la estabilidad y continuidad del servicio eléctrico en los usuarios y logrando incrementar sus oportunidades de crecimiento económico, social y calidad de vida [43].

En el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, se presenta en la sección tres un escenario de generación distribuida basado en energía solar donde se dan datos del año 2022, donde se tiene una capacidad instalada de 2.6 MW, a la par se tiene una proyección de capacidad para el año 2037 de 11.4 MW, solamente en generación distribuida en base a la energía solar[41]. En la sección cuatro se presenta porcentajes de generación distribuida por diferentes tipos de tecnología en el periodo de 2023-2026, dando un total de capacidad instalada de 20.4 MW, donde el actor principal serán los proyectos de ciclo combinado, le siguen los sistemas de fotovoltaicos con una porcentaje del 30 %, los bancos de batería con un 11.4 % y los sistemas eólicos con 9.8 % [41].

Por otro lado el INEEL en su reporte de actividades del 2022, se presenta proyectos basados en desarrollar tecnología para el almacenamiento de energías basas en baterías y realizaron el primer inversor fotovoltaico de 1kW con tecnología mexicana, lo que nuevamente respalda la necesidad de seguir trabajando en la electrónica de potencia que nos permita hacer una transición energética [37].

El CRE, con el programa Regulatorio del 2022, se da a conocer que se mantiene la regla de que los sistemas de generación distribuida sean menores 0.5 MVA, en redes de 1 a 13.8 kV. De igual forma deben de cumplir con el código de re 2.0 de México, que indica que debe de cumplir ciertas criterios para cumplir con la calidad de la energía como lo son, el factor de potencia y/o regulación Volt/VAR, distorsión armónica de corriente, desbalances y soporte de variación de voltaje. Para ello, el uso óptimo de herramientas modernas en redes eléctricas como inversores inteligentes, sistemas de almacenamiento de energía y controles jerárquicos de redes y microrredes [44].

Por otro lado los privados han podido demostrar en México que es viable la generación distribuida

a partir de las microrredes. Algunas empresas transnacionales y nacionales han decidido invertir en la generación de su propia energía, haciendo como tal microrredes aisladas para su uso en sus fábricas, tal es el caso de Bimbo, Walmart, Pepsico, Grupo Modelo, Nissan, dando a entender que no solo el compromiso de cumplir las metas de los ODS, involucra a los gobiernos, si no a la industria privada.

Bimbo en su reporte anual de actividades del año 2022, da estrategias de corto y mediano alcance para poder cumplir con los acuerdos establecidos en RE100, donde es la única empresa mexicana que participa en el acuerdo de llevar todas sus operaciones con energía 100 % renovable. En ese año Bimbo cumplió la meta de operar con energía renovable, su estrategia fue tener techos solares en sus centros de venta, de igual forma esta implementando sistemas de almacenamiento de energía, para evitar apagones por la variabilidad de las FER [45].

El parque eólico Piedra Larga, en Oaxaca, México es uno de los puntos de generación de energía eólica de Bimbo en México, el cual tiene un capacidad de 6.2 MW, lo componen 45 aerogeneradores, de 67 m de altura de la torre y con un diámetro de rotor de 80 m, en el punto de generación se tienen velocidades de 10 [m/s] [46]. A su vez, la empresa mexicana agregó una potencia de 25 MW, de generación distribuida mediante su plan Bimbo Solar, estos puntos de generación fotovoltaica, se encuentran a lo largo del país en diferentes puntos de ventas de la empresa, según el informe del 2019 [47].

Por otro lado empresas transnacionales como el caso de Walmart, han invertido en la generación distribuida en México, teniendo un consumo de energía renovable del 65 % para sus operaciones en el año 2022, tiene una generacion de 1.2 GW/h, donde sus fuentes de energía principal, son tres parque eólicos ubicados en el estado de Oaxaca y una minihidraulica ubicada en el estado de Veracruz [48], [49].

Las armadoras de autos en México, también buscan hacerse de recursos renovables, tal es el caso de Audi, que ya teniendo un parque fotovoltaico en el norte del país que proporciona la energía suficiente para poder ensamblar el auto Q5, sin embargo ahora se encuentra gestionando un parque solar, en el estado de Puebla, con una capacidad de 4.2 kW, para poder colocar mas armadoras y cubrir su demanda de energía y así poder cumplir con el acuerdo RE100 [50].

2.3 Capacidad propuesta en microrred eléctrica inteligente

Para este trabajo se tiene una microrred híbrida, que consta con dos elementos de conversión de energía, uno fotovoltaico y el otro eólico y además de un sistema de almacenamiento de energía por medio de baterías, el sistema en general tiene una potencia total de 75kW en potencia activa.

En la Figura 1 se presenta el esquema propuesto para la microrred, con las respectivas potencias de cada uno de los elementos que están conectados. A la par se muestra conectado un rectificador al SCEE, después de esto se tiene colocado un inversor, es un punto donde convergen todos los elementos, llevando un voltaje en el enlace de CD de 660 V, por otro lado en la parte de CA, se tiene un voltaje de 230 Vrms.

En la salida de inversor se encuentran elementos pasivos, que son la resistencia y la inductancia. El valor dado a la resistencia es un valor pequeño de .05 hom, esta conectado en serie a una inductancia con un valor de 8.25×10^{-4} H, todo estos elementos están antes de conectarse al PCC.

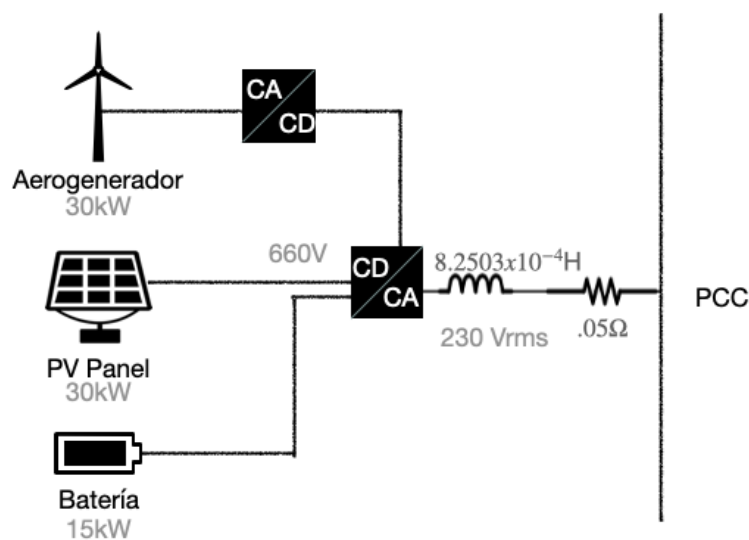


Figura 1: Esquema propuesto de la microrred, con los valores potencia y tensión.

3 Modelado de la microrred eléctrica inteligente

La generación de energía a partir de las FER, tienen una dependencia a las condiciones ambientales, como es la temperatura y las fluctuaciones de la radiación solar, del viento; estas crean impactos en la generación de la energía, que perjudican a la estabilidad del voltaje en el PCC.

En este capítulo se describen los dos sistemas de conversión de energía, el sistema de almacenamiento de energía y el controlador PI que ocupará la microrred. En cada uno se presentará el principio de funcionamiento de la tecnología, se modela los elementos principales, entre ellos se presenta el convertidor elevador Boost, el controlador de fuente de voltaje que se utiliza como inversor; para cada uno se presentarán las ecuaciones con las cuales se trabajan para poder llegar al resultado de la unión de cada uno de los elementos.

La unión de los elementos nos permite visualizar como funciona la microrred en conjunto, para llegar a obtener un voltaje constante en el enlace de CD de 660 V y de 230 Vrms en CA.

3.1 Sistema de conversión de energía eólica

La energía eólica es la transformación de la energía cinética del viento a energía eléctrica, todo es posible por un conjunto de elementos en que constituyen una turbina de viento, también conocida como aerogenerador. Esta tiene elementos como las aspas, que van conectadas a un rotor, que este a su vez forma parte de la góndola, en ella, se encuentran elementos como la caja multiplicadora y el generador, el cuál es el encargado de pasar la energía mecánica a eléctrica. Para este tema de tesis, la parte en la que se desarrollará, será en el generador eléctrico.

Los principales tipos de generadores se encuentran de inducción, también conocidos como asíncronos y por otro lado están los síncronos. Los generadores asíncronos se dividen principalmente en dos, los cuáles son de jaula de ardilla o de rotor bobinado, mientras que para los generadores síncronos, se tiene el generador de imanes permanentes. La principal característica de los generadores asíncronos es que ellos pueden producir la torsión para que arranque el motor, esto se debe a que la velocidad del giro

del rotor esta desincronizada con la del campo magnético giratorio, haciéndolos generadores de arranque automático. Por otro lado los generadores síncronos tienen la necesidad de una conmutación mecánica para poder funcionar, dando como resultado que la velocidad del rotor con la del campo magnético sean las mismas y giren para el mismo sentido [51].

Los generadores síncronos son más comunes ya que llegan a presentar menos problemas de fallo conectados a la red que los generadores asíncronos [52]. Los armónicos son otro factor que hace que los generadores síncronos sean seleccionados antes que los asíncronos, ya que se presentan con unos transitorios más cortos que los asíncronos; el factor de potencia en los generadores síncronos llega a ser más cercano al unitario que los asíncronos, para que estos puedan llegar a un valor permitido en el factor de potencia, se requiere dispositivos de electrónica de potencia adicionales [53], [54].

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (1)$$

En la Ecuación 1, se da a conocer la potencia entregada de un aerogenerador. Los valores de entrada que se necesitan conocer, es el radio del aerogenerador (R), la velocidad del viento (v), el coeficiente de potencia que es la máxima potencia que puede ser extraída (Cp), en relación con la velocidad en la punta del aspa (λ) y el ángulo de ataque (β), cabe mencionar que el valor del Cp, no rebasa el límite de Betz (16/27), por último la densidad del fluido (ρ) que en este caso es del aire [55].

$$P_m = T_m \omega_r \quad (2)$$

En la Ecuación 2, define la Potencia Mecánica P_m , que tiene la relación entre la velocidad angular ω_r y torque mecánico T_m .

$$T_m = T_e + D\omega_r + H \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3)$$

El torque mecánico se obtiene de la Ecuación 3 en donde están involucrados H, D que son los parámetros de inercia y de fricción característicos del generador y el torque electromecánico.

El torque electromecánico se da en la ecuación 4.

$$T_e = \frac{3}{2} \left[i^d (L^q - L^d) + \lambda_m \right] i^q \quad (4)$$

Para esta investigación se ocupan modelos de PMSG de geometría cilíndrica, porque la inductancia es

uniforme y permite que los cálculos sean mas sencillos. En la ecuación 5, se define el torque electro-mecánico con la inductancia uniforme ($L^q=L^d$), se simplifica lo que se tenían en la ecuación 4.

$$T_e = \frac{3}{2} \lambda_m i^q \quad (5)$$

3.1.1 Configuración del Sistema de Conversión de Energía Eólica

La configuración del SCEE interconectado a la red, se presenta en la Figura 2, donde se visualizan los principales elementos que contiene sistema. Partimos del aerogenerador con un generador PMSG, este esta conectado a un rectificador que cambia la corriente de CA-CD, posteriormente se encuentra el enlace de CD, que esta conectado a la entrada de un VSC en modo rectificador que hace la función de convertir de CD-CA, en la parte final, se encuentra una resistencia y una inductancia, esta nos permite generar el comportamiento sinusoidal en la red.

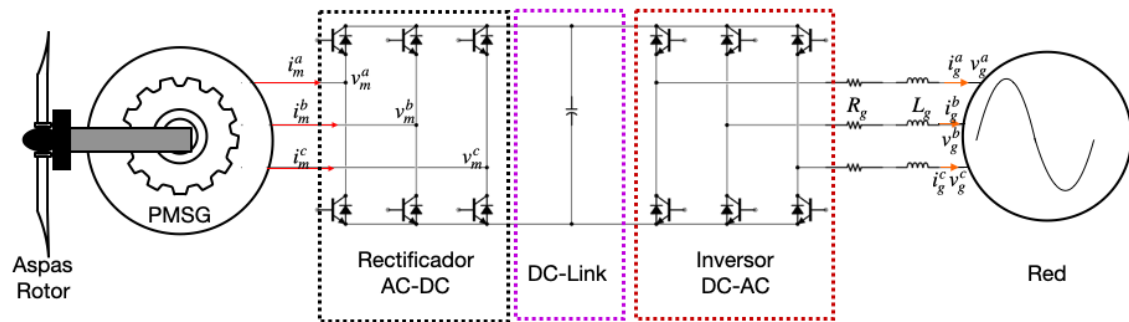


Figura 2: Topología de un sistema de conversión de energía eólica [56].

3.2 Sistema de conversión de energía fotovoltaica

La celda fotovoltaica es la unidad básica que transforma la energía solar en electricidad. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico, el cual se produce al exponer una unión de dos materiales semiconductores, uno tipo N y otro tipo P, a la radiación electromagnética del Sol. La energía de los fotones solares es suficiente para liberar electrones de los átomos de la unión del material semiconductor, lo que genera una corriente eléctrica.

Las curvas de corriente-voltaje son una herramienta útil para entender el funcionamiento de las celdas fotovoltaicas y determinar su punto de corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto, potencia

máxima y eficiencia. Sin embargo, el comportamiento de estas curvas varía dependiendo de la tecnología utilizada en la construcción de las celdas fotovoltaicas. Por ejemplo, las curvas de las celdas solares monocristalinas, policristalinas y amorfas tendrán comportamientos diferentes. La cantidad de luz solar incidente, conocida como irradiancia, es un factor crítico que influye en la cantidad de corriente de cortocircuito que una celda solar puede producir, así como en la cantidad de energía total que puede generar. Este factor tiene un efecto directo sobre la potencia máxima que se puede obtener de la celda solar. Las celdas monocristalinas, aunque generalmente tienen una corriente de cortocircuito menor que las celdas policristalinas, tienen un voltaje máximo comparable. Además, estas tecnologías suelen tener una mejor eficiencia con niveles de irradiancia más bajos. Por otro lado, las celdas amorfas tienen una relación en la que tanto la corriente como el voltaje máximo son más altos que en las celdas mono y policristalinas. Sin embargo, su eficiencia es menor a niveles de irradiancia más bajos.[57].

En la Figura 3, se muestra un esquema del efecto fotovoltaico, en el cual se pueden ver los dos semiconductores que tiene la celda fotovoltaica. El material semiconductor de tipo N es responsable de la incorporación de impurezas donadoras en la celda solar, debido a que tiene más electrones disponibles en su estructura atómica, lo que da lugar a una carga neta negativa. En cambio, el material semiconductor de tipo P está dopado con impurezas receptoras, ya que su estructura atómica tiene menos electrones de valencia en comparación con el material de tipo N. La formación de los "huecos", que no son otra cosa que enlaces covalente incompletos dan como resultado una carga aparente positiva, debido a la falta de electrones.

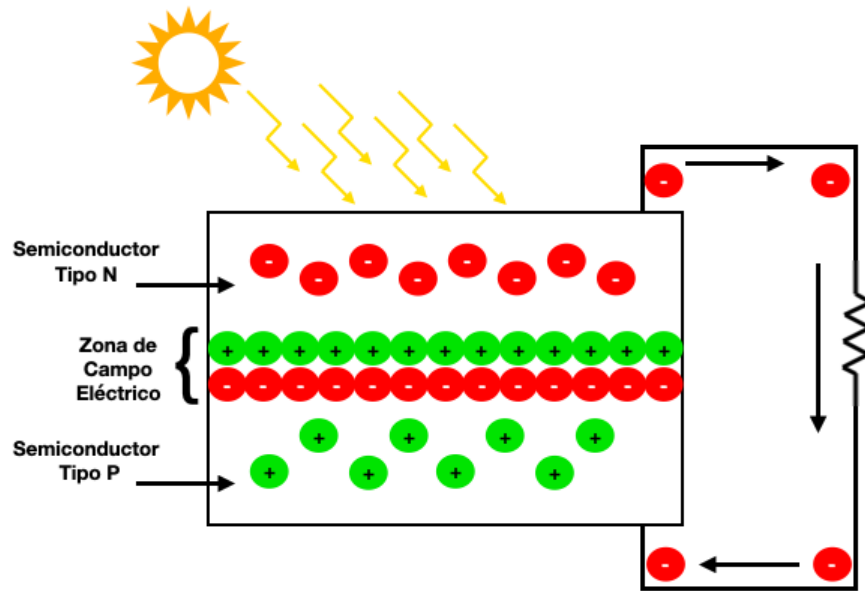


Figura 3: Esquema del efecto fotovoltaico.

La Figura 4 se presenta el diagrama de una celda solar fotovoltaica equivalente. Se parte, que la fuente, es independiente ya que genera energía de manera autónoma con el efecto fotovoltaico, a el están conectados tres elementos uno en serie y dos en paralelo. En serie se encuentra una resistencia, mientras que en paralelo, se tiene un diodo y otra elemento resistivo.

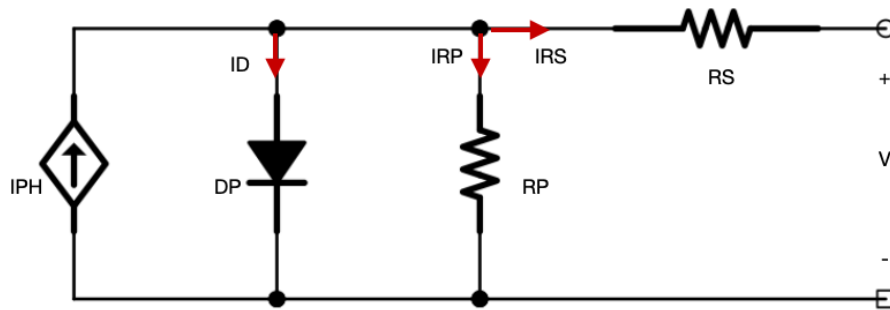


Figura 4: Circuito equivalente a una celda fotovoltaico [58].

$$I_{pv} = I_{PH} - I_D - I_{RP} \quad (6)$$

La Ecuación 6, define la corriente entregada por la celda fotovoltaica I_{pv} , la cual tiene relación con la corriente fotogenera I_D , la cual tiene una dependencia de la irradiancia, I_{RP} es la corriente que pasa por el elemento pasivo que es la resistencia en paralelo, por ultimo se tiene I_{RS} , es la resistencia que se

encuentra en serie.

3.2.1 Dimensionamiento del Arreglo Fotovoltaico.

Para conocer el dimensionamiento del Arreglo Fotovoltaico (ARF), es necesario hacer el uso de algunas de ecuaciones y el conocer datos de entrada, como son la potencia del ARF y la tensión de acoplamiento del inversor.

El número de total de módulos (N_{TM}) a utilizar se obtiene de la ecuación (7). Donde P_{mAFV} , es la potencia máxima que puede entregar el arreglo bajo condiciones estándar, la máxima potencia generada por el módulo bajo condiciones estándares de prueba, está representada por P_{mAFV} .

$$N_{TM} = \frac{P_{mAFV}}{P_{mMFV}} \quad (7)$$

En la ecuación (8), se calcula el número de módulos en serie (N_{MS}) que necesitan.

$$N_{MS} = \frac{V_{INV}}{V_{mMFV}} \quad (8)$$

El voltaje de acoplamiento del inversor se encuentra representado con V_{INV} ; por otro lado V_{mMFV} el voltaje máximo en el punto de máxima potencia. Sí el resultado no es un entero, se redondeará al entero inmediato superior. Para el caso de los módulos en paralelo se ocupa la ecuación (9), en la cual se necesita conocer el N_{TM} y el N_{MS} .

$$N_{MP} = \frac{N_{TM}}{N_{MS}} \quad (9)$$

3.2.2 Convertidor elevador CD/CD

El convertidor Boost es utilizado principalmente para elevar el voltaje en CD. En la figura 5, se presenta el esquema convencional, donde se observa que el boost se compone por una inductancia, un diodo, un capacitor y un transistor IGBT o MOSFET, como un interruptor controlado.

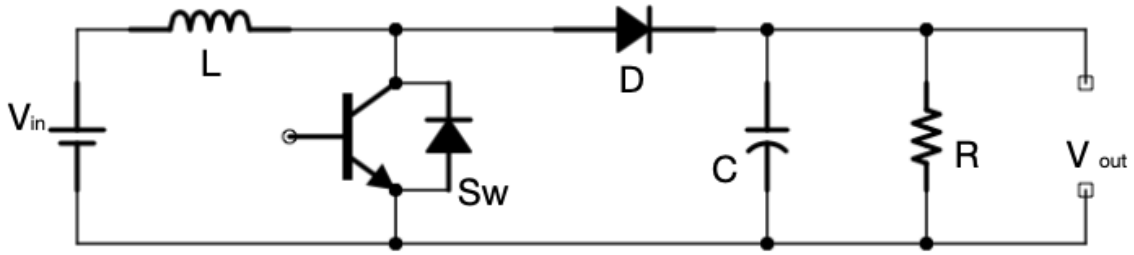


Figura 5: Esquema del circuito convertidor elevador Boost CD/CD, en estado encendido [59].

En la figura 5, el estado del boost es encendido, quiere decir que el interruptor está cerrado, lo que hace que la corriente fluya a través del inductor (L), lo que produce un campo magnético. En la figura 6, se presenta el convertidor elevador en estado apagado. El interruptor está abierto lo que produce que la energía almacenada en el L, se pase al diodo (D) y se carga el capacitor para que la tensión del circuito sea continua, a su vez servirá para cubrir la carga (R). La corriente del inductor se reducirá a medida que el voltaje a través del inductor se invierte y el campo magnético generado previamente disminuirá para mantener el flujo de corriente hacia la carga.

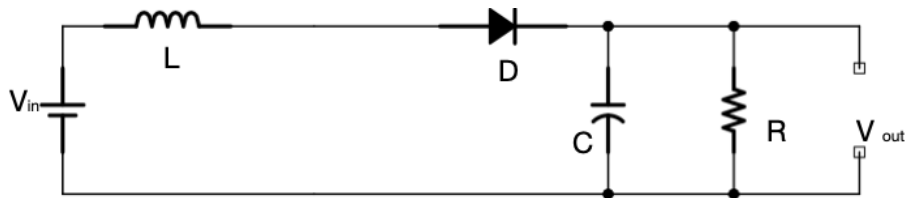


Figura 6: Esquema del circuito convertidor elevador Boost CD/CD, en estado apagado [59].

La ecuación característica de del convertidor se expresa en (10):

$$V_{out} = nV_c \Rightarrow n \frac{V_{in}}{1-D} \quad (10)$$

Donde n indica el número de niveles que se agregaran, V_{in} es el voltaje de entrada y D representa el ciclo de servicio.

3.2.3 Configuración del Sistema de Conversión de Energía Solar.

En la Figura 7, se da a conocer la configuración de un SCES, donde se observan los elementos con los que se cuentan para inyectar la energía fotovoltaica a una red eléctrica. Se presenta un circuito equivalente de una celda fotovoltaica, este va conectado a Boost elevador, para este tesis, el Boost elevador, en estado

encendido, tiene una entrada de voltaje de 330 V, para dar una salida de 660 V y conectarlo al enlace de CD, posteriormente a eso, se tiene un VSC en modo inversor, que convierte de CD-CA, el cuál a su salida esta conectado con elementos pasivos, una resistencia y una inductancia, estos últimos elementos se encuentran conectados a la red eléctrica.

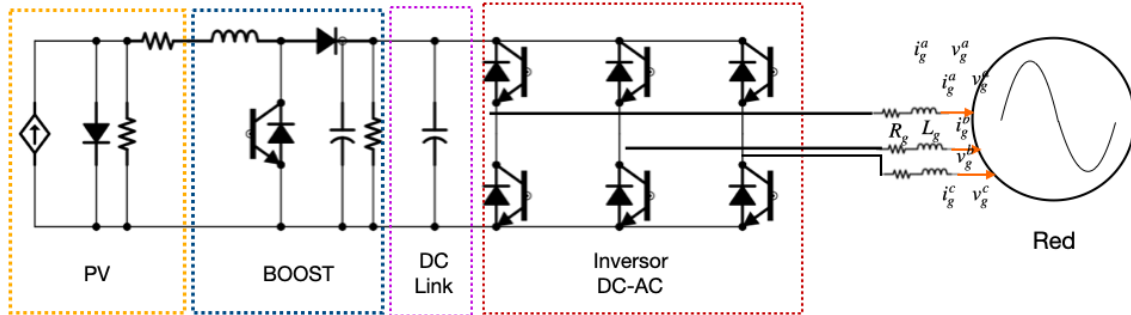


Figura 7: Topología de un sistema de conversión de energía fotovoltaico [58].

3.3 Sistema de almacenamiento de energía por medio de Baterías

La variabilidad de la generación de energía a partir de fuentes renovables, crea la necesidad de almacenar la energía, por lo que se han desarrollado diferentes principios de almacenamiento, los cuales son mecánica, térmica, química, electroquímica y eléctrica. Cada uno de ellos cuenta con ventajas y desventajas; sin embargo, esto será determinado de acuerdo a los requerimientos que tenga el usuario. A medida que las fuentes de energías renovables van tomando terreno en la generación de energía, se han tenido que desarrollar sistemas de almacenamiento de energía, para poder contrarrestar los problemas de variabilidad, que presentan tanto la energía eólica y solar. El almacenamiento de energía aumenta la flexibilidad de operación y limita la variabilidad de la generación de energía a partir de las FER, los SAE, producen un orden en la inyección de la energía a la red eléctrica, ya que evitan que funcionen con carga parcial [60].

Para este trabajo se optó por un sistema de almacenamiento de energía electroquímico especialmente las baterías de ion-Litio, las principales ventajas de estas baterías, son la densidad de energía, con un rango de 150-350 [Wh/kg] y los ciclos de vida que van de los 1500 a los 4500. Se refiere a densidad energética, a la cantidad de energía que puede almacenarse en un peso o volumen determinado; por otra parte, los ciclos de vida da una referencia, de cuantas veces puede ser cargada la batería y pierda un porcentaje de su eficiencia [61], [62], [63]. En la tabla 1, se presentan datos de comparación con otro

Tecnología	Rango de Potencia (MW)	Eficiencia (%)	Densidad de Potencia	Densidad Energética (Wh/kg)	Tiempo de Almacenamiento	Tiempo de Vida (años)	Ciclos de Vida (ciclos)
Ácido-Plomo	Hasta 20	70-85	75-300	30-50	min-days	3-20	2000-4500
NaS	0.05-8	76-86	150-230	150-250	s-h	5-15	2500-4500
Ni-Cd	Hasta 40	60-70	50-1000	15-300	min-days	10-20	2000-2500
Li-ion	Hasta 0.01	85-95	50-2000	150-350	min-days	5-15	1500-4500

Cuadro 1: Tabla de comparación de diferentes materiales para el almacenamiento electroquímico [64], [65],[66].

tipo de material, para la misma tecnología de almacenamiento electroquímico.

Para poder conocer el voltaje en la batería, debemos de tener dos tiempos sucesivos, en el que se consideren, la potencia de carga p^c , potencia de descarga p^d , eficiencia de carga η^c , eficiencia de descarga η^d y la tasa de autodescarga ζ . En 11, encontramos la relación que tienen estas variables en el BESS [62].

$$V_{bat} = V_{t-1}(1 - \zeta) + p_{t-1}^c \cdot \Delta t \cdot \eta^c - p_{t-1}^d \cdot \frac{\Delta t}{\eta^d} \quad (11)$$

En la Figura 8, se presenta un circuito equivalente de una batería, esta compuesta con tres elementos en serie con la fuente, dos de ellos son un arreglo en paralelo de una resistencia y un capacitor.

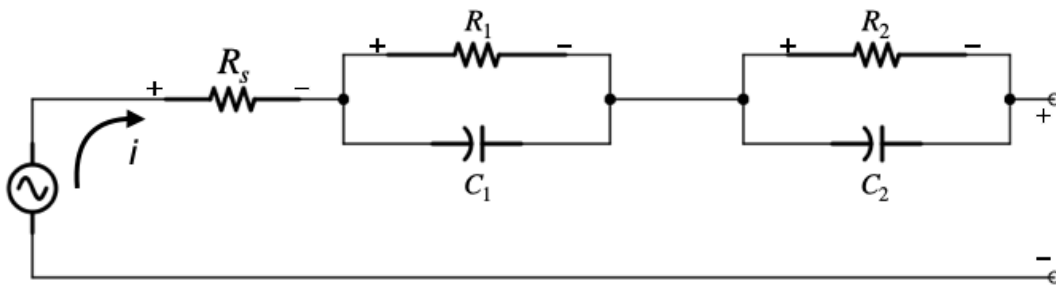


Figura 8: Esquema de un BESS [67].

3.3.1 Configuración del Sistema de Almacenamiento de Energía por medio de Baterías.

La Figura 9, presenta la interconexión de un BESS, en un principio, se tiene un circuito equivalente de una batería, el cual esta enlazada al enlace de CD, posteriormente a eso, se encuentra el VSC, este funciona en modo inversor, ya convertida la corriente ene alterna, se pasa por una resistencia y una inductancia de la microrred, para ser conectados a la red eléctrica.

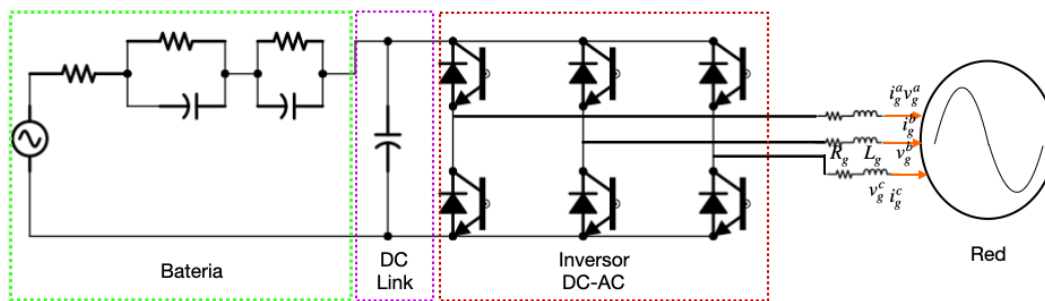


Figura 9: Topología de un Sistema de Almacenamiento de Energía por medio de Baterías, interconectado a la red [67].

3.4 Unidad de generación

3.4.1 Modelado y configuración de una microrred utilizando la metodología Software In Loop SIL.

En esta investigación para, demostrar y validar la conformación de una microrred, se debe tener la certeza de funcionamiento de manera robusta y eficiente de la metodología SIL, fenómenos adversos a la calidad de la energía (tales como: alto contenido armónico, factor de potencia no unitario), pérdidas de una o más unidades de fuentes de generación variable e incluso evitar riesgos que atenten contra la existencia del ser.

Entonces, la necesidad de representar digitalmente el comportamiento de las redes eléctricas a conllevado al desarrollo de varios programas computacionales utilizando técnicas de integración numérica para resolver ecuaciones diferenciales que representan en conjunto a los equipos eléctricos de una red como generadores, transformadores y líneas de transmisión, en donde es deseable contar con técnicas de simulación que representen la operación de las microrredes de la forma más exacta posible.

En este escenario, una limitante de exactitud resulta cuando se seleccionan pasos de integración numérica muy pequeños para simular redes eléctricas de gran tamaño o con alto nivel de detalle, lo cual puede generar tiempos de análisis digital mucho mayores que el tiempo físico del fenómeno eléctrico analizado. En consecuencia, varios desarrolladores de simuladores digitales han propuesto nuevas técnicas de análisis numérico, capaces de llevar a cabo simulaciones con múltiples pasos de tiempo y/o operación en paralelo de procesadores, logrando así operar modelos computacionales que funcionan a la misma velocidad que el sistema real que representan, solidificando así el concepto de simulación en tiempo real. En otras palabras, la simulación en tiempo real asegura que la simulación de un fenómeno eléctrico de unos pocos segundos, tarde en efecto los mismos pocos segundos. En ocasiones el tiempo de cómputo puede ser mayor o menor que el tiempo discreto, ocasionando simulaciones fuera de línea [68].

Algunos simuladores comerciales en tiempo real son: Opal-RT Technologies® [69], simulador digital en tiempo real (RTDS®) [70] en esta tesis se propone la validación de una microrred eléctrica, que cuenta con dos sistemas de conversión de energía, uno eólico y el otro fotovoltaico, al igual se integra un sistema de almacenamiento de energía por medio de baterías, como se observa en la Figura 10, mediante la metodología SIL, donde la integración del código fuente es compilado en un modelo matemático, proporcionando un entorno de simulación virtual para el desarrollo y prueba de estrategias de control detalladas para sistemas grandes y complejos [71].

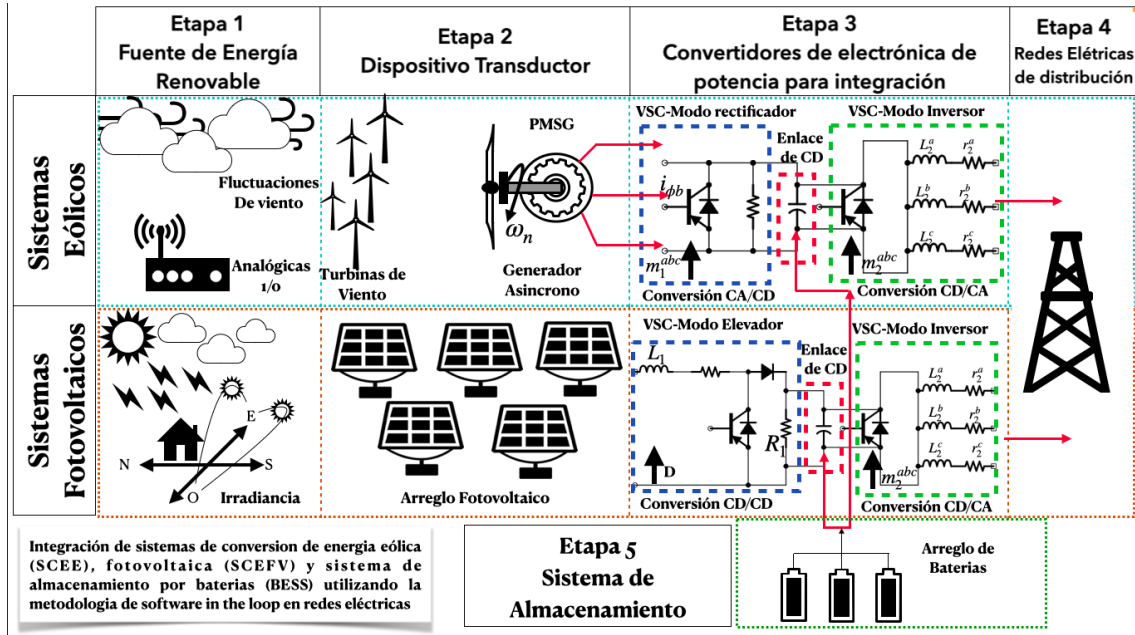


Figura 10: Estructura de la Microrred.

La formación de la microrred da como resultado una inyección de potencia activa de 75 kW en un PCC de la red eléctrica de distribución, es decir, el SCEE integra 30 kW, al igual que el SCEF, mientras que el BESS añade 15kW.

En la Ecuación 12, se presenta la potencia total que suministra la microrred, donde P_{SCEE} , P_{SCEF} , P_{BESS} , son las potencias de cada uno de los elementos que contiene la microrred.

$$P_{Total} = P_{SCEE} + P_{SCEF} + P_{BESS} \quad (12)$$

En este escenario, los convertidores de electrónica de potencia están enfocados en proporcionar control y flexibilidad a las redes eléctricas, desde la generación basada en los SCEE y SCEFV hasta el usuario final, es decir, es la aplicación de electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica, con la máxima eficiencia posible [72].

3.4.2 Convertidor de electrónica de Potencia de CD-CA trifásico - Voltage Source Converter (VSC)

Para poder mantener una estabilidad en la microrred, se utilizará un controlador de corriente, este nos permitirá pasar la corriente necesaria que utiliza nuestra microrred. Para esto se empezó a utilizar la ley de voltaje de Kirchoff, que nos indica que la suma de todas las caídas de voltajes en un lazo cerrado

es igual al total de del voltaje suministrado, esto se puede ver en la Ecuación (13).

$$\sum_{k=1}^n V_K = V_1 + V_2 + V_2 + V_4 + \dots + V_n = 0 \quad (13)$$

En la Figura 11, se presenta un esquema acotado de la microrred, donde únicamente se muestran los puntos toma de voltaje de la microrred, del lado de salida del VSC.

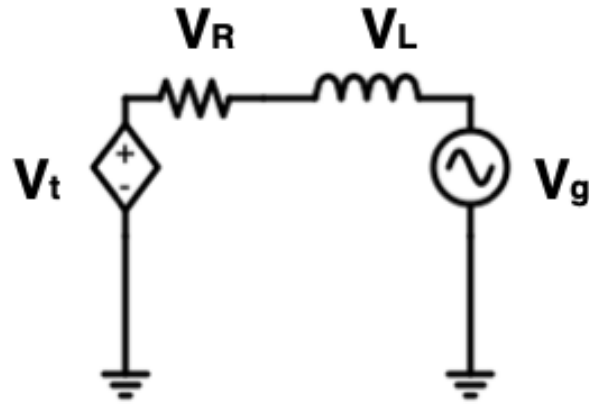


Figura 11: Diagrama de voltajes del VSC [73].

$$-V_t + V_R + V_L + V_g = 0 \quad (14)$$

En la Ecuación (14), se representan los voltajes que se muestran en la Figura 11, en la cual podemos observar la relación de cada uno de los voltajes que están en la malla anterior. Donde V_t es voltaje trifásico en las terminales de AC del VSC, V_g es el voltaje de la red, V_R es el voltaje de la resistencia y V_L el voltaje de la inductancia, estos dos últimos elementos representan la impedancia de acoplamiento.

$$\vec{V}_t^{abc} - \vec{V}_g^{abc} = \vec{R}^{abc} \vec{i}_L^{abc} + \vec{L}^{abc} \frac{d}{dt} \vec{i}_L^{abc} \quad (15)$$

En la ecuación (15), se hace un cambio de la expresión algebraica que se tenía en la ecuación (14) a una ecuación diferencial, lo que indica que el comportamiento a lo largo del tiempo debe de ser igual. El flujo de potencia está determinado por la dirección de la corriente i_L^{abc} que circule por la impedancia de acoplamiento. Cuando el VSC, funciona como inversor, existe un desfase de 180° entre la corriente i_L^{abc} y el voltaje de la red, V_g^{abc} . Los superíndices a,b,c se ocupan para poder identificar las fases del sistema trifásico que están desfasadas 120° . En (16), se presenta el voltaje trifásico en función del índice de

modulación (m^{abc}) y el voltaje de en CD (V_{CD}).

$$\vec{V}_t^{abc}(t) = \frac{1}{2} \vec{m}^{abc}(t) * V_{DC}(t) \quad (16)$$

Sustituyendo en la Ecuación (16), en (15), nos da como resultado la Ecuación (17).

$$\vec{L}^{abc} \frac{d}{dt} \vec{i}_L^{abc} = \frac{1}{2} \vec{m}^{abc}(t) * V_{DC}(t) - \vec{V}_g^{abc} - \vec{R}^{abc} \vec{i}_L^{abc} \quad (17)$$

Basándonos en la transformación de Clarke y Park, podemos pasar a utilizar el marco de referencia dq0. La transformada de Clarke, nos permite pasar de coordenadas trifásicas a coordenadas estacionarias, por otro lado la transformada de Park, permite pasar a coordenadas rotativas, para esta transformada, se necesita tener un punto de referencia, donde partir. La transformada de Park, también conocida como marco de referencia dq0 ayuda a que el análisis de maquinas eléctricas en especial, motores y generadores sea mas sencillo. El marco de referencia dq0, permite presentar el acoplamiento cruzado de la inductancia, entre la corriente activa i_d y la corriente reactiva i_q , estas Ecuaciones se presentan en (18a), (18b).

$$\frac{d}{dt} \vec{i}_L^d = \frac{1}{\vec{L}_d} \left(\left[\frac{1}{2} \vec{m}^d(t) \cdot V_{DC}(t) \right] - \vec{V}_g^d - \vec{R}^d \vec{i}_L^d - (\vec{L}_{q*\omega_0}) \cdot \vec{i}_q \right) \quad (18a)$$

$$\frac{d}{dt} \vec{i}_L^q = \frac{1}{\vec{L}_q} \left(\left[\frac{1}{2} \vec{m}^q(t) \cdot V_{DC}(t) \right] - \vec{V}_g^q - \vec{R}^q \vec{i}_L^q + (\vec{L}_{d*\omega_0}) \cdot \vec{i}_d \right) \quad (18b)$$

Despejando el índice de modulación, queda la Ecuación (19), que nos permitirá ir desarrollando el control de corriente, dando como resultado una ecuación de primer orden.

$$\vec{m}^d(t) = \frac{2}{V_{DC}} \left[\vec{L}^d * \left(\frac{d}{dt} \vec{i}^d(t) \right) + \vec{R}(i^d(t) + \vec{V}_g^d(t) - (\vec{L}_{q*\omega_0}) \cdot \vec{i}_q \right) \right] \quad (19a)$$

$$\vec{m}^q(t) = \frac{2}{V_{DC}} \left[\vec{L}^q \cdot \left(\frac{d}{dt} \vec{i}^q(t) \right) + \vec{R}(i^q(t) + \vec{V}_g^q(t) + (\vec{L}_{d*\omega_0}) \cdot \vec{i}_d \right) \right] \quad (19b)$$

Se debe resaltar que la planta del sistema esta dada por la impedancia de acoplamiento que como se menciono anteriormente, está conformada por la parte inductiva y resistiva, esto se ve en (20).

$$\vec{e}^{dq}(t) = \vec{L}^{dq} \cdot \frac{d}{dt} \vec{i}_L^{dq} + (\vec{R}^{dq} \cdot \vec{i}_L^{dq}) \quad (20)$$

Con la transformada de Laplace, podemos pasar del dominio del tiempo al de la frecuencia. La ecuación (19) esta en el dominio del tiempo, mientras que ya aplicando la transformada de Laplace nos da como resultado la ecuación (21).

$$\vec{m}^{dq} = \frac{2}{\vec{V}^{dq}(s)} \left[(\vec{L}^{dq} \cdot \vec{s}^{dq} + \vec{R}^{dq}) \vec{i}^{dq}(s) + \vec{V}_g^{dq}(s) \pm [\vec{L}^{dq} - \omega_0] \vec{i}^{dq}(s) \right] \quad (21)$$

Para poder controlar la corriente y la potencia se hizo uso de los controladores PDI. La función de transferencia nos da la relación de una señal de salida y una de entrada en un lazo cerrado. El polo de la planta se da en (22).

$$s(s) = \frac{-\vec{R}^{dq}}{\vec{L}^{dq}}(s) \quad (22)$$

Están cerca del origen, para evitar que empiece a caer la magnitud y la fase de la ganancia en frecuencias bajas, se ocupa el cero del compensador PI, éste se da en (23), con la ganancia proporcional e integral.

$$s(s) = \frac{-\vec{k}_i^{dq}}{\vec{k}_p^{dq}}(s) \quad (23)$$

En (24), se tiene la relación ente el polo de la planta y el cero del controlador PI (22) y (23), donde τ_j es el tiempo que tarda en ejecutar el lazo cerrado de la función de trasferencia de primer orden.

$$\frac{\frac{k_p}{\tau_j}}{\frac{k_i}{\tau_j}} = \frac{-R}{L} \quad (24)$$

La potencia activa y reactiva son calculadas en las siguientes Ecuaciones (25),(26), son independientes por la corriente. Donde i_d e i_q , son la corriente, V_d es el voltaje, las tres componentes pertenecen al marco de referencia dq0.

$$P_{sref}(t) = \frac{3}{2} \cdot V_d i_d \quad (25)$$

$$Q_{sref}(t) = \frac{3}{2} \cdot V_d i_q \quad (26)$$

4 Integración de potencia activa en redes de distribución

En este capítulo se desarrollarán siete casos de estudios, tres son hechos en simulación utilizando Matlab-Simulink , los cuatro restantes son validados en tiempo real con el equipo de Opal-RT Technologies . En estos siete casos se presenta el comportamiento de la inyección de potencia activa, a su vez se da una visualización del voltaje en el enlace de CD. Posteriormente a estos casos, se presenta un caso donde los valores de entrada en el SCEE y SCES, son con datos reales, los datos obtenidos son de Mérida, Yucatán y los datos de carga son obtenidos de CENACE .

4.1 Resultados de la integración de potencia activa en redes de distribución ocupando Matlab-Simulink

En la Figura 12, se presenta la simulación del primer caso de estudio mediante Matlab-Simulink , en este caso solo se modelo la integración del sistema eólico, con una capacidad de 30 kW. En la parte superior se da a conocer el comportamiento que tuvo el inyectar la potencia activa a la red; observamos que en el inicio tiene un arranque en cero, ya que contaba con un paso de tiempo, donde el valor inicial de velocidad angular es de -15π , y el valor final para entregar la máxima potencia del rotor asíncrono es de -45π a partir de ese tiempo se observa que el valor es constante.

Por otro lado en la parte inferior de la Figura 12, se muestra el voltaje en el punto de unión del enlace de CD, en este caso se puede analizar que el comportamiento es rizado, esto se debe a las pérdidas por conmutación de los elementos pasivos de la microrred.

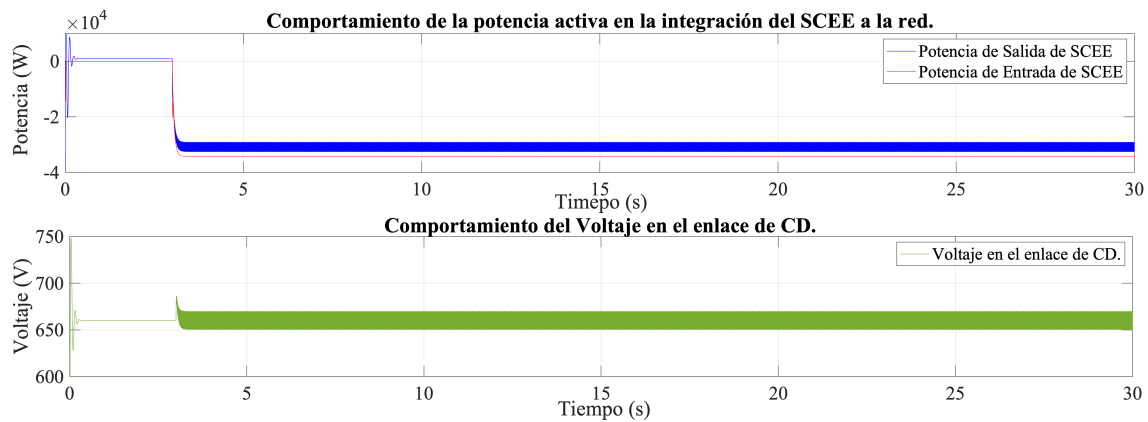


Figura 12: Gráfica del comportamiento de la potencia activa del SCEE y el voltaje en el enlace de CD.

En la Figura 13, se modela únicamente la inyección del SCEF a la red, en este caso se presenta en el primer segundo un paso de tiempo, donde el valor inicial es de 500 Wm^2 para tener un valor final de 1000 Wm^2 . En estos pasos de tiempo, se tiene un transitorio, en el que se ve que en lugar de inyectar potencia activa, se convierte en una carga para la red eléctrica.

En la Ecuación (27), podemos ver la relación de salida y entra del SCEF a la red, dando un valor de 1. En la parte inferior de la Figura 13, se tiene pocas pérdidas por conmutación, se puede ver que esto se da en los pasos de tiempo donde se cambia del valor inicial al valor final de la irradiancia a la que se ajusto el sistema.

$$\text{Eficiencia} = \frac{2,99}{3,12} = 0,9583 \quad (27)$$

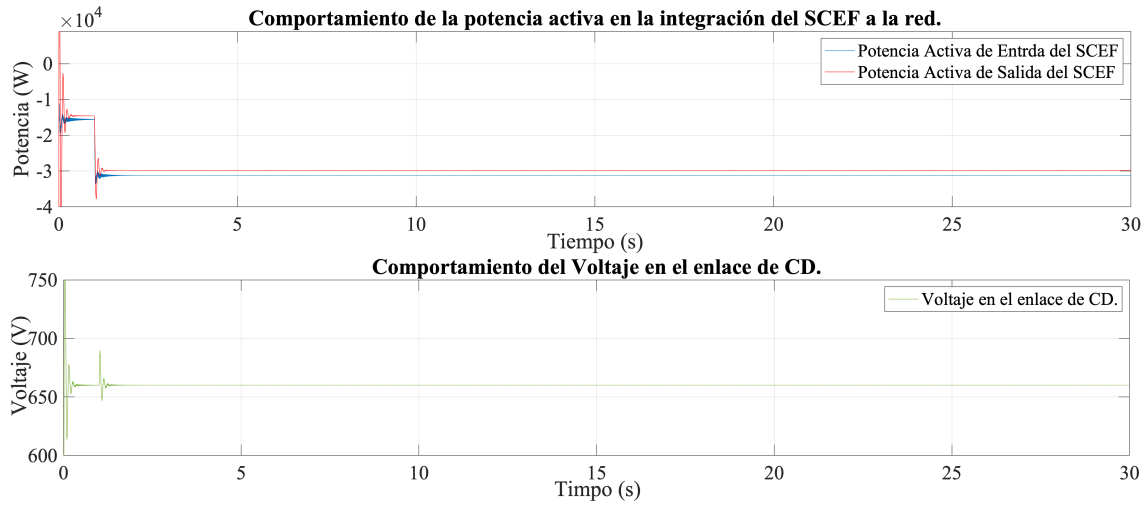


Figura 13: Gráfica del comportamiento de la potencia activa del SCEF y el voltaje en el enlace de CD.

La Ecuación 27, se presenta la forma de obtener la eficiencia de de la integración de los SCEE y SCEF. En la Tabla 2, se presentan las ganancias.

Caso de estudio	Potencia de Entrda [kW]	Potencia de Salida [kW]	Eficiencia [%]
SCEE	3.25	3.40	95.58
SCEF	2.99	3.12	95.83

Cuadro 2: Tabla de eficiencias para los casos de estudio del SCEE y SCEF.

El tercer caso de estudio se presenta en la Figura 14, donde lo único que se simula es BESS. En la parte superior se presenta la inyección de la Potencia Activa, donde vemos que la parte de la entrada tiene un valor cercano a los 17 kW, mientras que el valor de salida da un valor menor cercano a los 15kW.

La parte inferior muestra el comportamiento del voltaje, en este punto es constante y no se perciben pérdidas por conmutación.

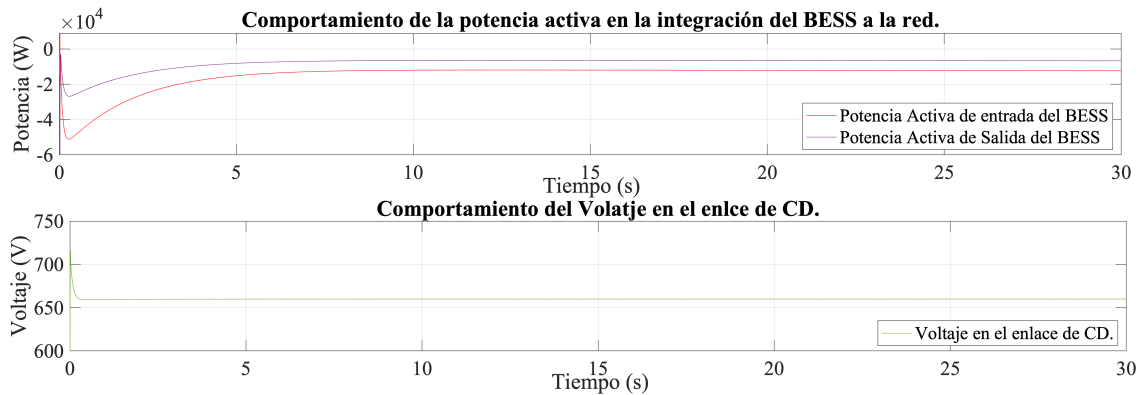


Figura 14: Gráfica del comportamiento de la potencia activa del BESS y el voltaje en el enlace de CD.

4.2 Resultados de la integración de potencia activa en redes de distribución ocupando Opal-RT Technologies

La Figura 15 se muestra la primera simulación en tiempo real con Opal-RT Technologies , en ella se presenta el caso de estudio de la conexión de dos sistemas de conversión de energía, los cuales son el sistema eólico y el fotovoltaico. En la parte superior se observa el comportamiento separado de cada uno de los sistemas de conversión de energía, siendo el fotovoltaico el que en un inicio tiene una potencia cercana a los 15 [kW], en el segundo uno y medio, pasa a inyectar 30 [kW], por otro lado se puede observar que en el caso del SCEE, entra hasta el segundo tres y medio, inyectando otros 30 [kW], dando como resultado final una inyección de potencia activa total de 60[kW].

En la parte inferior de la Figura 15, nos podemos percatar que mientras el SCEF, se encuentra único, el comportamiento del voltaje en el punto de acoplamiento no tiene pérdidas de conmutación, pero cuando se integra el SCEE, se empieza a tener un rizo, en el voltaje, sin embargo este no presenta una mala calidad de la energía ya que esta en el límite aceptable del 5 % inferior del voltaje de distorsión armónica total.

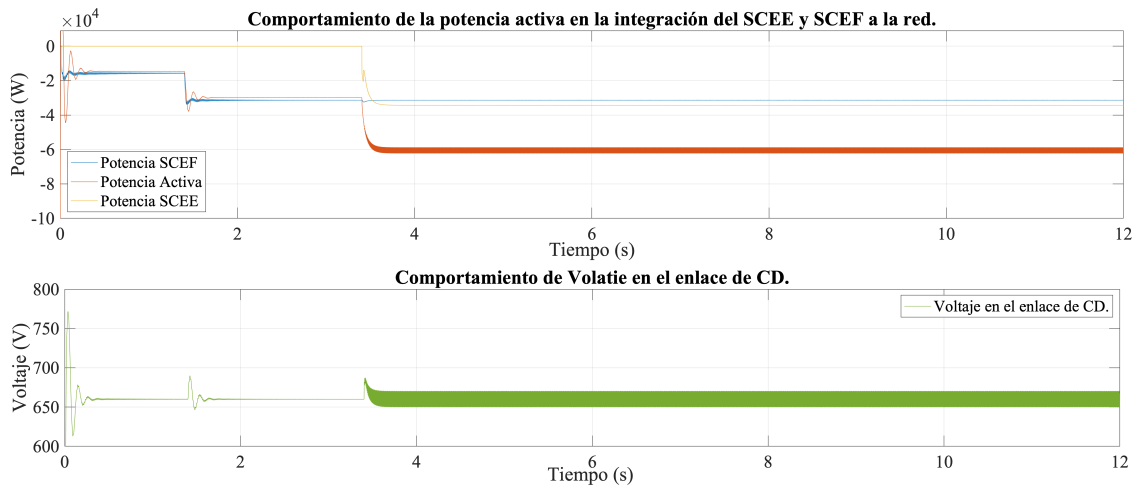


Figura 15: Gráfica del comportamiento de la potencia activa y el voltaje en el enlace de CD, de la combinación SCEE y SCEF.

En 16, se muestra el caso de estudio de combinación del SCEE y el BESS, en la parte superior se muestra la inyección de potencia activa, el BESS, entra con una potencia de 15 [kW], tiene el tiempo suficiente para cargarse y estabilizarse, ya que en el segundo tres es donde entra el SCEE con 30 [kW], dando como resultado un potencia total de 45 [kW].

Por otro lado la parte inferior de la Figura 16, se da el comportamiento del voltaje en el enlace de CD, lo que se destaca, es que apartir del segundo tres, cuando entra el SCEE, se tiene pérdidas por conmutación. Sin embargo se da el voltaje que se busca, que es de 660 [V].

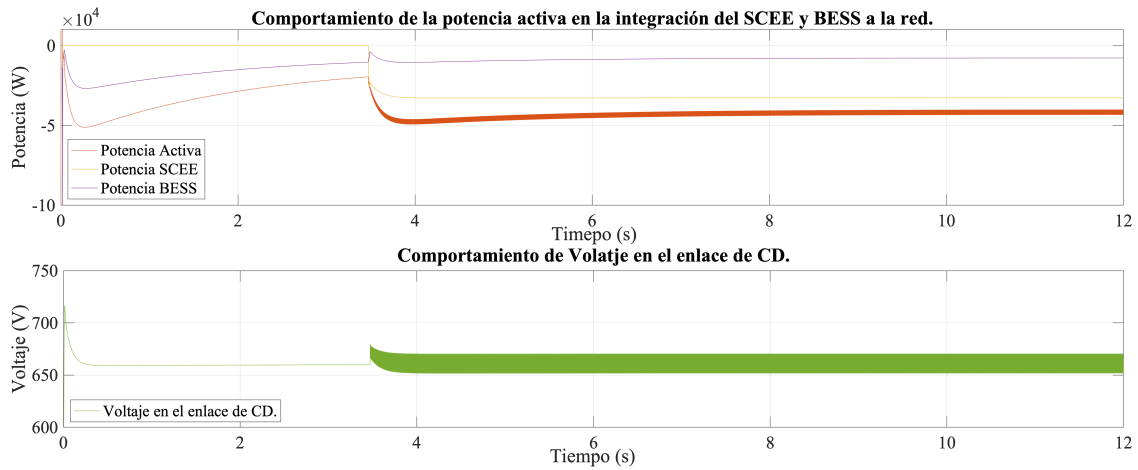


Figura 16: Gráfica del comportamiento de la potencia activa y el voltaje en el enlace de CD, de la combinación SCEE y BESS.

La Figura 17, se da la conexión del SCEF y el BESS, en este caso de estudio se puede observar que el BESS, no tiene el tiempo suficiente para estabilizarse ya que en el segundo uno el SCEF, entra a su máxima potencia, se puede ver que en el segundo cero se tiene una inyección de potencia total de 30 [kW], a partir de que entra en el SCEF, a su máxima potencia la inyección total de potencia activa es de 45 [kW].

En el enlace de CD, no presenta ninguna pérdida, por lo que se puede decir que el voltaje de distorsión armónica total es aceptable, por lo que se puede comentar que la calidad de energía para este caso es admisible, esto se muestra en la parte inferior de la Figura 17.

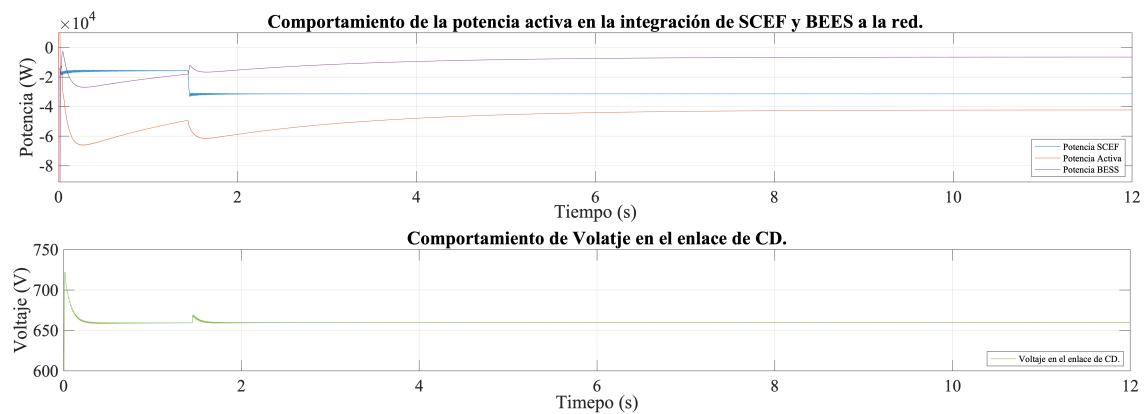


Figura 17: Gráfica del comportamiento de la potencia activa y el voltaje en el enlace de CD, de la combinación SCEF y BESS.

El ultimo caso sin datos reales para la generación de energía en los SCEE y SCEF, se presenta en la Figura 18, donde se integran los dos sistemas de conversión de energía, el fotovoltaico y el eólico, a su vez el sistema de almacenamiento de energía por baterías. En la parte superior, se da el comportamiento de la inyección de potencia activa, se aprecia que el valor inicial total es de 30 [kW], sumando el BESS y el SCEF este ultimo con una inyección de 15 [kW], en los primeros diez segundos, esto se debe que se necesita estabilizar la batería. Posterior a los diez segundos entra el SCEF a su máxima potencia, lo que da como resultado una inyección de potencia activa de 45 [kW], por ultimo a los 20 segundos, empieza la introducción del SCEE con 30 [kW], dando como resultado final una inyección total de 75 [kW].

En la parte inferior de la Figura 18, se da el comportamiento del voltaje en el enlace de CD, en donde podemos ver que no importando la inyección de la potencia el voltaje se mantiene en 660 [V]. En el segundo 20 donde se introduce el SCEE, se ve un rizo, dando un aumento no mayor al 5 % nos habla de la calidad de la energía es aceptable. Este rizo se debe a las pérdidas por conmutación que genera el rectificador de diodos que se ocupa en la microrred.

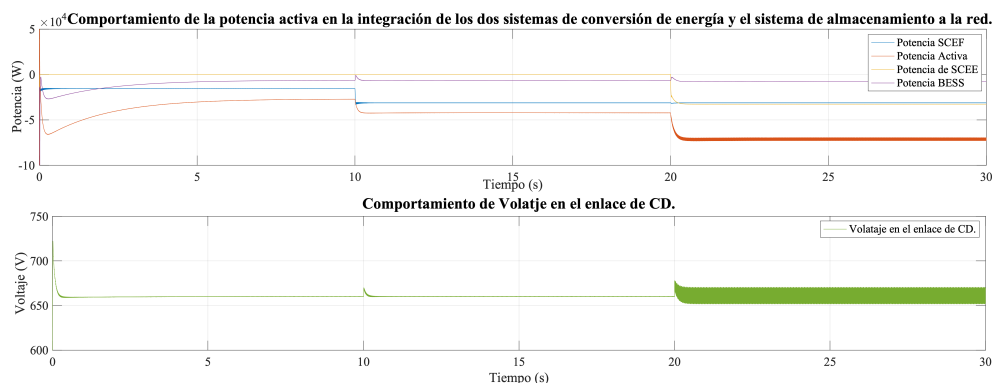


Figura 18: Gráfica del comportamiento de la potencia activa y el voltaje en el enlace de CD, de la unión de generación de los sistemas de conversión de energía y el sistema de almacenamiento.

Los datos de entrada para SCEE y SCEF provienen de Mérida, Yucatán, y Temixco, Morelos. En la Fig. 19, se presentan dos gráficas, en las cuales se puede visualizar la suma de la inyección de potencia activa de todos los sistemas. Como potencias individuales, se puede observar que SCEE es el que más inyecta con una potencia de 28 kW, seguido de BESS con una potencia de 15 kW, y por último SCEF, que tiene una curva distintiva de un sistema fotovoltaico. Su potencia nominal se sitúa en el tiempo 14 segundos, con una potencia cercana a los 18 kW, lo que da como resultado una potencia nominal total de 61 kW. Por otro lado, la gráfica inferior muestra la tensión en el enlace de CD, donde se puede observar que la tensión se mantiene en un valor de 660 V en todo momento, se puede ver que en momentos llega a

tenr ruido y deja de ser lineal como en las imagenes anteriores, sin embargo no rebasa el 10 %, permitido.

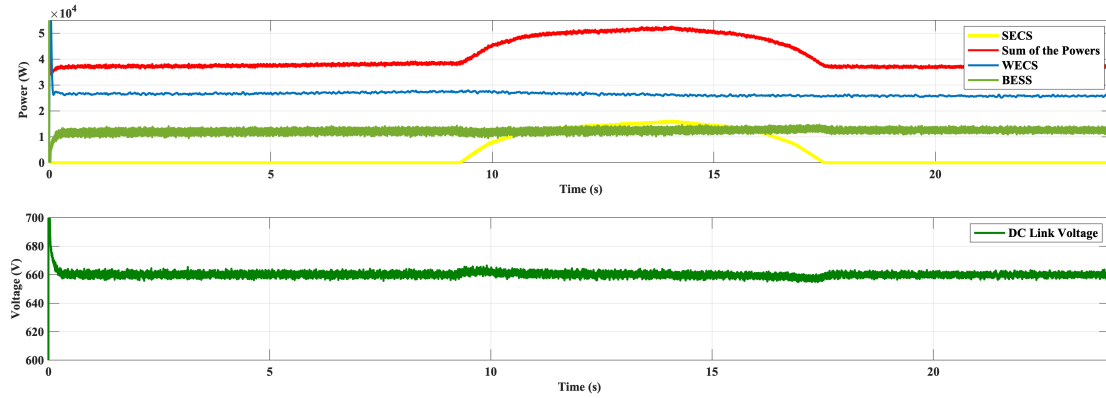


Figura 19: Comportamiento de la suma de potencia activa y el voltaje en el enlace de CD, con datos reales de comportamiento de viento e irradiancia.

En la Figura 20 se muestra la curva característica de la carga (señal morada), con los datos basados en CENACE, se puede ver que la demanda tiene un pico en el segundo 0, siendo este su mayor consumo energético, por otro lado en el segundo 7.5, se tiene el punto donde el consumo es mas bajo, pero no llega a ser cero. Por otro lado en la curva naranja, se observa como se satisface la demanda con la potencia que se inyecta, se puede mencionar que la curva tiene la misma forma que se tiene en la figura 19, pero con valores de consumo, por lo que podemos decir que se satisface la energía que se consume.

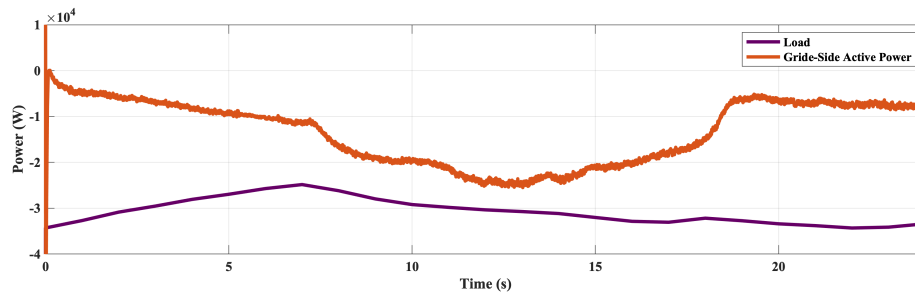


Figura 20: Comportamiento de la carga y del la potencia activa vista del lado de la red con la resta de la demanda.

Finalmente, los índices de la calidad de la energía de la microrred, se presentan en las Figuras 21, 22 donde se muestran que, la integración de potencia se encuentran en un rango permitido del código de red 2.0. Es decir, el comportamiento del voltaje se presenta en la parte inferior, en el cual se puede ver que hasta que es integrado el SCEE, se empiezan a tener pérdidas por conmutación, sin embargo, la calidad de la corriente integrada por la microrred contiene un THDIrms > 2 %, tal y como se observa en

la Figura 21. Mientras que, el factor de potencia se considera $FP \approx 1$, tal y como se observa en la Figura 22, debido a que el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente es de 180° , cuando se esta inyectando potencia activa a la red de distribución.

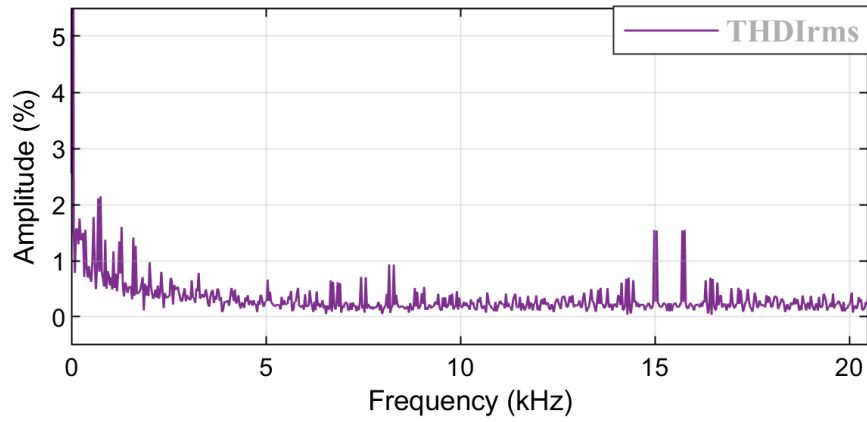


Figura 21: THD presente en la integración de la microrred.

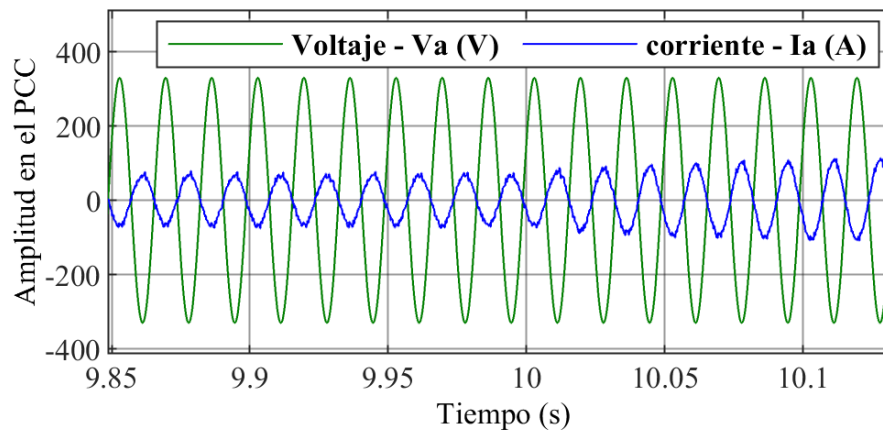


Figura 22: Desfase entre voltaje y corriente de la fase a en el PCC.

5 Conclusiones

En esta tesis se ha presentado una estrategia de interconexión de una microrred, integrando potencia activa en la red eléctrica de distribución. La generación distribuida se ha inyectado mediante los accesos de energía renovable basados en SCEE y SCES interconectados en un PCC y se ha formado una microrred híbrida al incorporar un BESS.

El escenario de estudio se ha realizado a través del modelo matemático completo, los resultados de simulación se han corroborado en MATLAB-Simulink®, los resultados de validación se han hecho mediante la metodología SIL y el simulador en tiempo real Opal-RT Technologies®. Con esta investigación se ha proporcionado un entorno de simulación virtual para el desarrollo y prueba de estrategias de control detalladas.

Finalmente, el código de red 2.0 en México se ha cumplido al acatar los índices técnicos de interconexión de plantas de generación distribuida menores a 0.5 MVA en redes de 1 a 13.8 kV, teniendo: Un factor de potencia ≈ 1 , una distorsión armónica total de corriente $\leq 2\%$, una compensación de voltaje del enlace de CD de 660V, se ha inyectado una potencia activa de 75kW en redes de distribución con una eficiencia del 95%. En los casos de estudio con datos reales de generación de energía, se observa que la inyección fue menor de los 82.5 kW a la que fue diseñada la red, por lo que se concluye que se han cumplido los objetivos que se propusieron y la hipótesis.

Para trabajos a futuro, se buscara tener tener un controlador mas robusto que pueda tener datos reales en el sistema de almacenamiento de energía, por otro lado se buscara poder inyectar Potencia Reactiva, sin modificar el voltaje en el enlace de CD.

6 Financiamiento

Esta investigación fue financiada en parte por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT-UNAM con clave DGAPA-PAPIIT-IA104522.

Referencias

- [1] A. Bárcena Ibarra, J. Samaniego, W. Peres, and J. E. Alatorre, *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿ seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?* CEPAL, 2020.
- [2] J. Ehnberg, “Teaching the sustainable development goals based on smart grids and vice versa,” in *2022 31st Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEEIE)*, pp. 1–6, 2022.
- [3] S. K. Mumbere, A. Fukuhara, Y. Sasaki, A. Bedawy, Y. Zoka, and N. Yorino, “Development of an energy management system tool for disaster resilience in islanded microgrid networks,” in *2021 20th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, pp. 97–100, 2021.
- [4] E. D. Vugrin, A. R. Castillo, and C. A. Silva-Monroy, “Resilience metrics for the electric power system: A performance-based approach.,” tech. rep., Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2017.
- [5] N. CEPAL, “Ods 7: Energía asequible y no contaminante,” 2019.
- [6] I. A. Samuel, D. I. Faith, A. A. Awelewa, A. A. Olajube, and J. Katende, “Review of energy utilization efficiency: Consumer behaviour,” in *2021 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*, pp. 729–735, 2021.
- [7] CEPAL, “Agenda 2030 en américa latina y el caribe: Plataforma regional de conocimiento.” <https://agenda2030.cepal.org/>, 2016. Accedido el 11 de abril de 2023.
- [8] M. Chuang, W. Yikuai, Z. Junda, C. Ke, G. Feixiang, C. Tao, and C. Songsong, “Research on user electricity consumption behavior and energy consumption modeling in big data environment,” in *2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, pp. 220–224, 2021.
- [9] S. Engel, J. Von Appen, E. Dörre, D. Nestle, and J. Ringelstein, “Results from the operation of a social energy management system,” in *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1–6, 2018.
- [10] IEA, *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA, 2021. License: CC BY 4.0.

- [11] Y. R. Li, F. Nejabatkhah, and H. Tian, *Unbalanced Voltage Compensation in Smart Hybrid Micro-grids*, pp. 253–289. 2023.
- [12] E. H. Mayoral, E. D. Reyes, R. I. Cortez, C. J. M. Hernández, C. D. A. Gómez, C. R. J. Román, J. D. R. Romero, O. R. Rivera, E. F. M. Santos, W. D. Gómez, *et al.*, “Power quality in renewable energy microgrids applications with energy storage technologies: Issues, challenges and mitigations,” *Electric Power Conversion and Micro-Grids*, 2021.
- [13] M. Farrokhhabadi, C. A. Cañizares, J. W. Simpson-Porco, E. Nasr, L. Fan, P. A. Mendoza-Araya, R. Tonkoski, U. Tamrakar, N. Hatzigiorgiou, D. Lagos, R. W. Wies, M. Paolone, M. Liserre, L. Meegahapola, M. Kabalan, A. H. Hajimiragha, D. Peralta, M. A. Elizondo, K. P. Schneider, F. K. Tuffner, and J. Reilly, “Microgrid stability definitions, analysis, and examples,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13–29, 2020.
- [14] M. A. Tabrizi, G. Radman, and A. Tamersi, “Micro grid voltage profile improvement using micro grid voltage controller,” in *2012 Proceedings of IEEE Southeastcon*, pp. 1–6, 2012.
- [15] K. Zhang, Y. Lv, Y. Zhang, C. Li, and Y. Yin, “Research on smooth switching control of off-grid mode and grid-connected mode in micro-grid,” in *2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, pp. 793–799, 2021.
- [16] L. Ting, Z. Weige, B. Yan, and W. Wei, “Research on configuration and profit analysis of micro-grid based on electricity retailers mode,” in *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 667–672, 2019.
- [17] S. Ahmed-Zaid, S. M. Loo, A. Valdepena-Delgado, and T. Beam, “Cyber-physical security assessment and resilience of a microgrid testbed,” in *2021 Resilience Week (RWS)*, pp. 1–3, 2021.
- [18] B. Li, “Multi-energy supply microgrids to enhance the resilience of the electric/gas/heat utility grid systems under natural disasters,” in *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 2495–2500, 2020.
- [19] P. Ghosh and M. De, “Impact of microgrid towards power system resilience improvement during extreme events,” in *2021 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, pp. 767–772, 2021.
- [20] I. R. E. Agency, “Microgrids for the transition to renewable energy,” June 2020. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Microgrids_2020.pdf.

- [21] I. E. Agency, *World Energy Outlook 2020*. Paris: IEA, 2020.
- [22] L. He, Z. Wei, H. Yan, K.-Y. Xv, M.-y. Zhao, and S. Cheng, "A day-ahead scheduling optimization model of multi-microgrid considering interactive power control," in *2019 4th international conference on intelligent green building and smart grid (IGBSG)*, pp. 666–669, IEEE, 2019.
- [23] J. E. M. Carreño, J. A. Marín, and G. C. T. Santillán, "Research facilities for renewable energy management considering distributed generation based on microgrids instalaciones de investigación para gestión de energías renovables considerando generación distribuida basada en microredes," in *2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pp. 1–6, 2019.
- [24] M. Khemir, M. Rojas, R. Popova, T. Feizi, H. Q. Nguyen, J. F. Heinekamp, and K. Strunz, "Real-world application of sustainable mobility in urban micro smart grids," in *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1–6, 2020.
- [25] International Energy Agency, "Smart grids," 2023.
- [26] M. Vijayaragavan, N. Madhanakkumar, M. G, and A. A. S, "Micro grid connected solar pv employment using for battery energy storage system," in *2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*, pp. 1–6, 2021.
- [27] E. Asmelash and R. Gorini, "International oil companies and the energy transition, international renewable energy agency, abu dhabi about irena the international renewable energy agency (irena) serves as the principal platform for international co-operation, a centre of excellence, a repository of policy, technology, resource and financial knowledge, and a driver of action on the ground to advance the transformation of the global energy system. an intergovernmental organisation established in 2011, irena promotes the widespread adoption and sustainable use of all forms of renewable energy, including bioenergy, geothermal, hydropower, ocean, solar and wind energy, in the pursuit of sustainable development, energy access, energy security and low-carbon economic growth and prosperity," 2021.
- [28] D. T. Ton and M. A. Smith, "The us department of energy's microgrid initiative," *The Electricity Journal*, vol. 25, no. 8, pp. 84–94, 2012.
- [29] UE, "Digitalising the energy system - eu action plan," 2022.

- [30] AIE, “Digital tools will help keep distributed solar pv growing strongly.” <https://www.iea.org/commentaries/digital-tools-will-help-keep-distributed-solar-pv-growing-strongly>, 2023. Licencia: CC BY 4.0.
- [31] S. Pramanick, N. Konar, S. Dey, S. Som, and P. K. Gayen, “Study on power quality phenomena of grid-connected ac micro-grid,” in *2021 Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, pp. 350–354, 2021.
- [32] A. M. Howlader, S. Sadoyama, L. R. Roose, and Y. Chen, “Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart pv inverters,” *Applied Energy*, vol. 258, p. 114000, 2020.
- [33] Y. Zhang, “Analysis of high gain dc-dc converters for dc microgrid,” in *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*, pp. 1354–1359, 2023.
- [34] J. Wu, Z. Qi, F. Yang, and X. Li, “The multi-objective optimal configuration of wind-pv-battery microgrid,” in *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 5585–5590, 2020.
- [35] S. Sun, J. Zhang, J. Liu, T. Wang, Y. Cheng, N. Wang, P. Yu, S. Wang, and C. Wang, “Soft-target model predictive control for pmsg-based wind generator,” in *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, vol. 1, pp. 919–923, 2019.
- [36] Secretaría de Energía, “Secretaría de Energía ¿Qué hacemos?,” 2014. 9 de noviembre del 2023.
- [37] Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, “Reporte de actividades 2022,” 2022.
- [38] “Comisión federal de electricidad (cfe).” <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/pages/queeslacfe.aspx>. Consultado el 29 de noviembre de 2023.
- [39] “Comisión Reguladora de Energía.” <https://www.gob.mx/cre/que-hacemos>. Accedido el 8 de noviembre de 2023.
- [40] Comisión Nacional de Energía, “¿Quiénes Somos?,” 2023.
- [41] S. de Energía (SENER), “Prodesen: Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2023-2037,” tech. rep., [En línea] <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>.
- [42] J. Lee and F. Zhao, “Global wind report: Global wind energy council,” tech. rep., 2021.

- [43] J. V. B. de Andrade, B. N. Rodrigues, I. F. S. dos Santos, J. Haddad, and G. L. Tiago Filho, "Constitutional aspects of distributed generation policies for promoting brazilian economic development," *Energy Policy*, vol. 143, p. 111555, 2020.
- [44] C. R. de la Energía, "Informe de labores 2022," tech. rep., Comisión Reguladora de la Energía., 2022.
- [45] "Informe anual." <https://d2rwhogv2mrkk6.cloudfront.net/s3fs-public/reportes-2023/GB-INFORME>
- [46] Bimbo, "Parque eólico piedra larga," Año de la consulta.
- [47] G. Bimbo, "Grupo bimbo reduce en más de 100 mil toneladas de co2e su huella," 2023.
- [48] W. de México y Centroamérica, "Cfe, walmart de méxico y centroamérica, bmw y schneider electric colaboran a favor del medio ambiente," 2015.
- [49] Walmart, "Informe sustentabilidad 2022," 2022.
- [50] Audi, "Audi méxico, una empresa con paso firme en la sustentabilidad," 2021.
- [51] J. M. Verduzco-Duran, A. Medina-Rios, and N. M. Salgado-Herrera, "State-space model of the wind energy conversion system integrated to power grid using type-4 wind turbine/pmsg," in *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, vol. 4, pp. 1–6, 2020.
- [52] N. Upadhayay, M. Nadarajah, and A. Ghosh, "System strength enhancement with synchronous condensers for power systems with high penetration of renewable energy generators," in *2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1–5, 2021.
- [53] V. Terzija and M. Akke, "Synchronous and asynchronous generators frequency and harmonics behavior after a sudden load rejection," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 730–736, 2003.
- [54] W. Apriliyanto, F. Danang Wijaya, and E. Firmansyah, "Performance of microgrid with photovoltaic, synchronous generator and induction generator power sources," in *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, pp. 1–6, 2016.
- [55] B. Driss, S. Farhat, K. Abdelilah, and E. M. A. M. Rachid, "Adaptive control for variable-speed wind generation systems using advanced rbf neural network," in *2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, pp. 1–5, 2020.

- [56] S. Sun, J. Zhang, J. Liu, T. Wang, Y. Cheng, N. Wang, P. Yu, S. Wang, and C. Wang, "Soft-target model predictive control for pmsg-based wind generator," in *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, vol. 1, pp. 919–923, 2019.
- [57] M.-u.-N. Khursheed, M. F. Nadeem Khan, G. Ali, and A. K. Khan, "A review of estimating solar photovoltaic cell parameters," in *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, pp. 1–6, 2019.
- [58] A. Hota, S. K. Bhuyan, and P. K. Hota, "Modeling simulation of photovoltaic system connected to grid using matlab," in *2020 International Conference on Renewable Energy Integration into Smart Grids: A Multidisciplinary Approach to Technology Modelling and Simulation (ICREISG)*, pp. 16–21, 2020.
- [59] N. Boujelben, F. Masmoudi, M. Djemel, and N. Derbel, "Design and comparison of quadratic boost and double cascade boost converters with boost converter," in *2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, pp. 245–252, 2017.
- [60] IRENA, "Quality infrastructure for smart mini-grids," 2020.
- [61] X. Li, R. Ma, L. Wang, S. Wang, and D. Hui, "Energy management strategy for hybrid energy storage systems with echelon-use power battery," in *2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, pp. 1–2, 2020.
- [62] P. Swain, K. Shanmugam, and K. Pradeep, "Operation control technology of multiple battery energy storage systems," in *2021 9th International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, pp. 72–77, 2021.
- [63] C. Hill and D. Chen, "Development of a real-time testing environment for battery energy storage systems in renewable energy applications," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8, 2011.
- [64] A. Poullikkas, "A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage," *Renewable and Sustainable energy reviews*, vol. 27, pp. 778–788, 2013.
- [65] T. Rahman, S. Motakabber, and M. Ibrahimy, "Design of a switching mode three phase inverter," in *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*, pp. 155–160, IEEE, 2016.

- [66] L. Zheng, J. Zhu, and G. Wang, "A comparative study of battery balancing strategies for different battery operation processes," in *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1–5, 2016.
- [67] C. Kamrueng, S. Kittiratsatcha, and S. Polmai, "A number of rc pairs consideration of electrical equivalent circuit model of li-ion battery," in *2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, pp. 1–4, 2020.
- [68] P. V. J. Bélanger. and J.-N. Paquin., "The what, where and why of real-time simulation," tech. rep., [En línea]. Available: <https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>. [último acceso: octubre 2022].
- [69] O.-R. C. Headquarters, "Leading the way in microgrid laboratory testing," 01 julio 2021. [En línea]. Available: https://www.opal-rt.com/resource-center/document/?resource=Mkt_0027277. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [70] R. T. Inc., "De-risk renewable energy and microgrids with real-time simulation and hardware-in-the-loop testing," [En línea]. Available: <https://www.rtds.com/applications/microgrids-renewable-energy/>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [71] F. M. Uriarte and C. Dufour, "Multicore methods to accelerate ship power system simulations," in *2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, pp. 139–146, 2013.
- [72] X. Hou, K. Sun, N. Zhang, F. Teng, X. Zhang, and T. C. Green, "Priority-driven self-optimizing power control scheme for interlinking converters of hybrid ac/dc microgrid clusters in decentralized manner," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 5970–5983, 2022.
- [73] N. M. Salgado-Herrera, F. Mancilla-David, A. Medina-Ríos, and R. Tapia-Sánchez, "Thd mitigation in type-4 wind turbine through afe back to back converter," in *2015 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–6, 2015.