

**EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE
ALMACENAMIENTO PARA MICROREDES**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE
ALMACENAMIENTO PARA MICROREDES**

**AUTOR:
DENNIS PAÚL RODRÍGUEZ ORTIZ**

**TUTOR:
JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO**

Quito, marzo 2020

Dennis Paúl Rodríguez Ortiz

EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PARA MICROREDES

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Dennis Paúl Rodríguez Ortiz (1990-08). Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. Áreas de interés: Sistemas de Energía Renovables, Sistemas Eléctricos de Potencia, Estabilidad de Frecuencia y Voltaje, Sistemas de Almacenamiento de Energía, Micro-redes.

drodriguezor@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Jorge Paúl Muñoz Pilco (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, Quito–Ecuador, 2014, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico. Además, cursó estudios de posgrado como becario de Fundación Carolina en la Universidad Pública de Navarra, Pamplona –España, 2017, obteniendo el título de Máster en Energías Renovables: Generación Eléctrica. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo en la Universidad Politécnica Salesiana. jmunoz@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PARA MICROREDES*” realizado por Dennis Paúl Rodríguez Ortiz, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., marzo de 2020



Jorge Paúl Muñoz Pilco

C.C.:1719006189

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Dennis Paúl Rodríguez Ortiz, con documento de identificación N° 1716744121 manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que soy el autor del trabajo de titulación intitulado: *“EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PARA MICROREDES”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Dennis Paúl Rodríguez Ortiz

C.C.: 1716744121

Quito, D.M., marzo de 2020

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Sistemas de Almacenamiento de Energía	4
2.1.1	Almacenamiento a gran escala	4
2.1.2	Almacenamiento en redes	4
2.1.3	Almacenamiento para consumidor final	4
2.2	Alcances del Almacenamiento de Energía.....	6
2.3	Consideraciones del Almacenamiento de Energía	6
2.4	Métodos de Almacenamiento de Energía.....	7
2.4.1	Baterías.....	7
2.4.2	Baterías de Flujo.....	7
2.4.3	Supercapacitores.....	7
2.4.4	Celdas de Combustible.....	8
2.4.5	Supercapacitores Magnéticos	8
2.4.6	Volantes de Inercia.....	8
2.4.7	Aire Comprimido	8
2.4.8	Bombeo Hidráulico	8
2.4.9	Térmica.....	8
2.5	Sistemas de Almacenamiento basados en Supercondensadores	9
2.5.1	Funcionamiento y Componentes	10
2.5.2	Características	10
2.5.3	Tipología	10
2.5.4	Aplicaciones	11
3	Micro-redes	12
3.1	Ventajas y Beneficios de una micro-red	12
3.2	Inconvenientes para implementar una micro-red	13
3.3	Objetivos de una micro-red	13
3.4	Arquitectura de una micro-red	13
3.4.1	Almacenamiento Distribuido	13
3.4.2	Cargas de la Micro - red	14
3.5	Operación de una micro-red	14
4	Estabilidad de Frecuencia	14

4.1	Respuesta del sistema ante perturbaciones severas.....	14
4.2	Naturaleza de los problemas de estabilidad de frecuencia.....	15
5	Estabilidad de Voltaje.....	15
6	Planteamiento del Problema.....	16
7	Resultados y Discusión.....	16
8	Conclusiones.....	17
9	Trabajos Futuros.....	18
10	Referencias.....	19
1.1	Matriz del Estado del Arte.....	22
1.2	Resumen de Indicadores.....	25

2. INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de los Elementos de una Micro – red.	4
Figura 2. Diseño de una micro – red en Matlab - Simulink	16
Figura 3. Voltaje y Corriente de Salida de la Batería.....	16
Figura 4. Potencias de Salida de la Batería. (a) Potencia Reactiva (b) Potencia activa.	17
Figura 5. Voltaje y Corriente de Salida del Supercondensador.....	17
Figura 6. Potencias de Salida del Supercondensador. (a) Potencia Reactiva (b) Potencia activa.....	17
Figura 7. Inestabilidad y Estabilidad de Voltaje durante y después de una perturbación. .	17
Figura 8. Inestabilidad y Estabilidad de Frecuencia durante y después de una perturbación.	17
Figura 9. Indicador de la Temática – Estado del Arte.....	25
Figura 10. Indicador Formulación del Problema.....	25
Figura 11. Indicador de Solución – Estado del Arte	25

3. INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de los dispositivos de almacenamiento.....	6
Tabla 2. Matriz de estado del arte	22

EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PARA MICROREDES

Resumen

La utilización de dispositivos almacenadores de energía ha tomado fuerza en lo que respecta a la generación de energía, ya que las fuentes de energía que operan en la actualidad tienen el problema de ser intermitentes; es ahí donde los elementos de almacenamiento cumplen un papel importante ya que brindan la capacidad de guardar energía con un nivel bajo en pérdidas para posteriormente a esto se entregue dicha energía de forma constante y cuando sea necesario. El desarrollo del presente artículo tiene como finalidad sintetizar conceptos referentes a los sistemas de energía renovables y su integración en las micro-redes. También se argumentará sobre los sistemas de almacenamiento de energía, específicamente los supercapacitores que son los encargados de guardar la energía en exceso que producen los sistemas de energía renovables, para luego esta ser utilizada en el instante donde exista mayor demanda. Por medio de simulaciones se obtendrá curvas que muestran el funcionamiento de los sistemas en condiciones óptimas y otras donde se indica las variaciones de voltaje y frecuencia ocasionados por una perturbación que después de un tiempo determinado el sistema vuelve alcanzar su estabilidad de voltaje y frecuencia por la acción del supercapacitor.

Palabras Clave: *estabilidad, micro - redes, sistemas renovables, regulación de frecuencia, supercondensadores*

Abstract

The use of energy storage devices has gained strength in terms of power generation, since the energy sources currently operating have the problem of being intermittent; It is there where the storage elements play an important role since they provide the ability to save energy with a low level of losses so that this energy is delivered consistently and when necessary. The purpose of this article is to synthesize concepts related to renewable energy systems and their integration into micro-networks. It will also be argued about energy storage systems, specifically the supercapacitors that are responsible for storing the excess energy produced by renewable energy systems, and then it will be used at the moment where there is greater demand. By means of simulations, curves will be obtained that show the operation of the systems in optimal conditions and others where the voltage and frequency variations caused by a disturbance are indicated that after a certain time the system returns to reach its voltage and frequency stability by the supercapacitor action.

Keywords: *stability, microgrids, renewable systems, frequency regulation, supercapacitors.*

1 Introducción

Con el transcurso del tiempo la generación de energía eléctrica, específicamente de plantas eólicas y solares, han tenido un constante crecimiento y desarrollo convirtiéndose así en fuentes principales de generación y abastecimiento de energía; pero, en muchos de los casos, la potencia de salida que proporcionan es variable debido a la naturaleza de los recursos que necesitan. Estas variaciones pueden provocar cambios negativos en lo que respecta a la calidad de la potencia generada y también ocasionan modificaciones de estabilidad en el punto de acople con la red. Para esta problemática es necesario plantear posibles soluciones y así mitigar dichas variaciones en la potencia que entrega los sistemas eólicos y en aquella que entrega los sistemas solares [1][2].

Las centrales ordinarias, específicamente de ciclo combinado, presentarán cambios ya que la integración de los sistemas eólicos y solares deben estar a la disponibilidad de los recursos que brinda el entorno. La inclusión de estos sistemas de energía renovable provocará la exigencia de que existan mayor cantidad de arranques y paradas; y de igual manera, menor tiempo de funcionamiento con su respectivo incremento de costos de operación y mantenimiento [1][2].

En la integración de generación renovable en sistemas eléctricos de grandes dimensiones, la generación gestionable debe constantemente enfrentar el requerimiento o a la demanda prevista menos la generación no gestionable. En el caso de sistemas térmicos, su resultado se obtendrá por medio de la diferencia entre la producción tanto hidráulica como de bombeo [1][3].

En los sistemas eólicos, sus generadores son los que actualmente presentan un gran avance y por tanto un notable desarrollo tecnológico. El viento es utilizado como fuente principal de energía, ya que no posee costos de

combustibles ni tampoco ocasiona algún impacto ambiental, pero puede originar un problema sobre la aleatoriedad de este recurso [1][3].

Aparte del problema antes descrito, se presenta otro inconveniente que es la carencia de almacenaje interno, y por esta razón se presentan grandes pérdidas de energía generada. Para tratar de resolver lo antes expuesto es de mucha utilidad obtener información sobre las predicciones del viento. Antes de la implementación de grandes granjas eólicas se realizan análisis estadísticos que permitan obtener como resultados los valores medios de la velocidad del viento. Estos datos obtenidos servirán para indicar la factibilidad tanto técnica como económica del proyecto y también para elaborar una planificación sobre el funcionamiento del sistema a largo plazo [3][4].

La utilización de métodos de almacenamiento es muy común dentro de los sistemas de energía y de las opciones que existen de estos dispositivos se encuentran aquellos que están en base de su capacidad de almacenaje y otros que se encuentran en base a la calidad de potencia de salida [4][5].

Entre los dispositivos de almacenaje de tipo potencial se encuentran aquellos que poseen corto tiempo de respuesta como son los volantes de inercia, supercondensadores, el almacenamiento magnético con supercapacitores o también identificado con las siglas SMES y algunas baterías de flujo. Una característica que tienen en común estos elementos es que el tiempo de respuesta es menor a un 25% del ciclo de la frecuencia de la red, es decir, menor que 5 milisegundos [4][5]. Estos dispositivos, aunque son bastante complejos y sus costos de instalación son elevados, poseen características que permiten a los sistemas poder efectuar un desempeño óptimo con una reducción significativa de costos de operación y mantenimiento en un futuro [4][5].

En lo que respecta a los supercapacitores, estos son elementos que poseen bajos requerimientos de mantenimiento y una robustez elevada, en cambio los volantes de inercia o también llamados flywheels tienen como características principales que poseen una elevada densidad de energía, tienen un impacto ambiental mínimo y en comparación con los demás dispositivos de almacenamiento, sus costos de instalación son menores [5][6].

Finalmente, las baterías de flujo, tienen una tensión nominal que se logra por medio de la conexión en serie de celdas dentro del dispositivo. La potencia varía dependiendo de la tensión de la pila y de la corriente de cada una de sus celdas, por esta razón, la potencia nominal y su almacenamiento pueden ser modificados por medio de la sustitución de la pila y de los tanques del electrolito. Una de sus características más importantes es su vida útil, logrando alcanzar un aproximado de 13000 ciclos tanto de carga como de descarga [4][6].

Actualmente, el estudio sobre generación distribuida está ocupando gran parte de la inversión tanto de recursos humanos y financieros por parte de empresas encargadas del servicio eléctrico como también de gobiernos que han apostado por esta iniciativa. Esto es debido, a que la integración de la red eléctrica de distribución de energía obtenida de sistemas renovables ha generado la creación de pequeños sistemas de generación distribuida provocando así nuevas dificultades que deberán ser resueltas para realizar dicha integración correctamente [4] [7]. A partir de eso nace el concepto de micro-red la cual encierra a estructuras pequeñas inteligentes de distribución eléctrica y que pueden operar de dos formas: la primera conectada a la red pública y la segunda de forma aislada del sistema. Estas micro-redes, en la actualidad, son estudiadas y en gran parte son implementadas en el sistema eléctrico; de

igual manera, forman parte de la revolución energética cuyos beneficiarios serán los consumidores y, por ende, el impacto ambiental será menor[6][7].

La gran parte de micro-redes brindan, entre sus ventajas, una mejor calidad en el servicio eléctrico, un ahorro considerable y poca relación con la red de distribución ya que permite un control más eficiente del consumo y realizan un análisis óptimo de los componentes del sistema [5][7].

Adicional a esto, la mayor proximidad que existe entre los sistemas de generación-demanda y la utilización en red de sistemas de energía renovables incrementan de forma cuantiosa la eficiencia energética del grupo. Estos sistemas también brindan una reducción de costos por concepto de distribución de energía ya que se encuentran cercanas las fuentes de generación y las cargas [6][7].

Una micro-red también involucra la utilización de energía descentralizada y con esto se minimiza la dependencia hacia la red de distribución convencional obteniendo así la posibilidad de repartir energía eléctrica a lugares que antes no tenían este servicio. En el caso de que exista alguna perturbación en la red de distribución, los consumidores pueden desconectarse de esta y obtener energía por medio del propio sistema; por esta razón, la red pública también tendrá su beneficio con la implementación de las micro-redes ya que aportarían de forma eficaz en su operación [4][7].

Con los cambios en la regulación del mercado eléctrico y los avances tecnológicos significativos que se han producido dentro de los pequeños sistemas de generación de energía se obtendrán nuevas ideas con respecto a la gestión e implementación de las micro-redes [7].

Por el interés que se ha mostrado con respecto al aprovechamiento de fuentes de energía renovable tanto para generación distribuida como también para micro-redes es importante realizar

un análisis sobre la integración de estas de forma más eficiente. Por causas de inestabilidad de las fuentes de energía es importante utilizar los distintos sistemas de almacenamiento y por medio estos lograr alcanzar un sistema más autónomo, fiable y robusto. Los distintos sistemas de almacenamiento proveen de una gran robustez y autonomía a los diferentes sistemas renovables existentes; su función es absorber energía obtenida de dichas fuentes para luego liberarla cuando exista mayor demanda, incremento en el costo de generación o simplemente cuando no se encuentre en operación alguna fuente de energía [5][6][7]. Estos elementos son concretamente, acumuladores de energía y permiten utilizarla cuando sea necesario. Si se presenta cualquier falla en el sistema de distribución, la micro-red puede dejar de operar con esta y suministrar a las cargas que posee conectadas gracias a la fuente del sistema renovable con su respectivo dispositivo de almacenamiento; esto aseguraría la entrega de energía a la micro-red y proporcionaría la reparación del sistema de distribución primario sin dejar de lado la energía brindada por la fuente de energía renovable [5][7].

2 Sistemas de Almacenamiento de Energía

El proceso de almacenaje de energía es un mecanismo que se ocupa con el propósito de conservar la energía y luego poderla liberar cuando sea necesario ya sea en la misma forma energética o en una distinta que puede ser cinética o potencial (elástica, química, gravitacional) [7][8]. Dentro de los distintos tipos de almacenamiento, por su capacidad se pueden clasificar en:

2.1.1 Almacenamiento a gran escala

Se utiliza en lugares en los que se trabaja con escalas de [GW]. Para este tipo de almacenamiento se puede citar a las centrales hidroeléctricas.

2.1.2 Almacenamiento en redes

Este tipo de almacenamiento trabaja con rangos en [MW] y pueden ser los supercondensadores o baterías y los volantes de inercia (flywheels).

2.1.3 Almacenamiento para consumidor final

Almacenamiento para consumidor final. – Estos sistemas de almacenamiento trabajan en [kW] y generalmente se utiliza a nivel residencial [8].

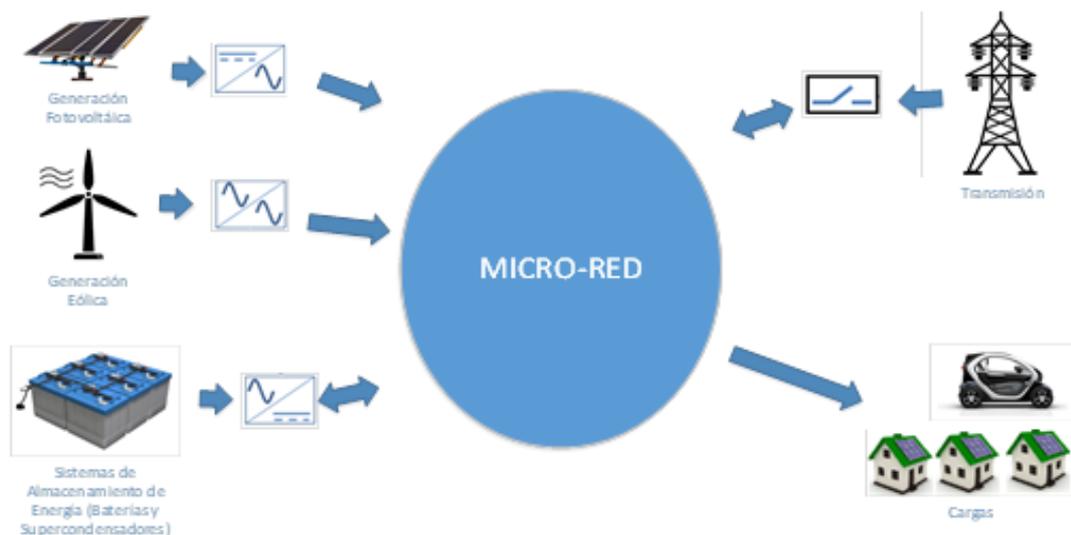


Figura 1. Diagrama esquemático de los Elementos de una Micro – red.

Los objetivos principales del almacenamiento de energía radican en la disminución de grandes diferencias de la curva de demanda, en su integración en los sistemas de energía renovable y en el avance de las redes inteligentes. Corrigiendo la curva de demanda se obtiene una mejor calidad en el suministro y una estabilidad adecuada del sistema evitando así el sobredimensionamiento e incrementando su eficiencia. Tanto la producción como el almacenamiento de energía de fuentes renovables son ideas que no pueden ser manejadas por separado y es indispensable crear de manera adecuada los sistemas de almacenamiento para que así se pueda desarrollar las fuentes de energía alternativas [6][8].

La obligación de buscar métodos de almacenamiento de energía se presenta por el desfase existente tanto en la generación como en la demanda. Dicho desfase viene dado por las variaciones que existen en la producción de energías renovables y por los diferentes procesos de consumo de energía. Actualmente, hay picos durante todo el día que deben ser abastecidos; sería necesario realizar un sobredimensionamiento grande de las plantas encargadas de la generación al producir la energía eléctrica necesaria para que se consuma, reduciendo así su eficiencia en la producción [7][8].

Las plantas de generación no se podrían basar en energías alternativas ya que en muchos casos su producción es aleatoria. Únicamente con centrales que producen energías no renovables se podría suplir de alguna manera la demanda requerida [8][9].

Las energías renovables tienen como características principales su traslado a lugares o áreas determinadas y la mínima intensidad con las que estas aparecen. Una ventaja para esta problemática es que existe la manera de explotar los recursos en varios sitios geográficos evitando que entre en un monopolio similar en el que

se encuentra el petróleo. Por otro lado, con la deslocalización se puede crear una red de almacenaje distribuida por varias zonas y repartir de forma sencilla la energía producida; otra opción es la de implementar plantas de manera tradicional para su tratamiento. La mayor desventaja es que las energías renovables se rigen específicamente a los flujos naturales y por esta razón su producción, en algunos casos, no se encuentra disponible cuando se requiere. Y es aquí donde tiene un valor importante el almacenamiento de energía ya que permite sacar la máxima producción de instalaciones de energía renovables [6][7][8].

Una característica adicional del almacenamiento de energía, muy aparte de toda la potencia que esta pueda guardar, es también el tiempo que esta requiera para almacenar energía hasta que la misma sea utilizada, lógicamente, sin ningún tipo de pérdida, ya que existen almacenamientos donde se pierde energía según el paso del tiempo [7][9].

Para poder elegir el tipo de almacenamiento, se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

1. Factor Energético

- Eficacia del dispositivo de almacenamiento.
- Durabilidad del sistema: cantidad de ciclos de carga como de descarga.
- La energía requerida para almacenar.
- Corto o largo plazo de almacenamiento.

2. Factor económico

- Costo por kW del método de almacenamiento.
- Costo por kW del método de transformación.

3. Factor Social

- Consecuencias provocadas por el sistema de almacenamiento ya sea estas sobre personas o por el consumo de la energía.

4. Factor Ambiental

- Problemas que estos sistemas provoquen directamente al medio ambiente ya sea por su fabricación, utilización o instalación [8][9].

2.2 Alcances del Almacenamiento de Energía

Las diversas fuentes renovables se encuentran conectadas a redes o micro-redes de electricidad, pero el cambio constante de la energía primaria da como resultados lapsos con deficiencia o exceso de energía; estas problemáticas han provocado la necesidad de establecer diversas maneras de conservar la energía de sobra para que cuando sea necesario, esta pueda ser utilizada [9][10].

El almacenaje de energía encierra un papel fundamental y crítico en lo que se refiere al futuro energético, estos sistemas:

- Permiten estabilizar tanto el sistema de transmisión como el de distribución.
- Proporcionan una utilización de la generación existente de forma mucho más eficiente.
- Son utilizados como amortiguador de precios, esto quiere decir que pueden suministrar energía en el instante en que los costos de la electricidad se encuentren altos, es decir, en las horas pico.
- Disminuyen la necesidad de poner en funcionamiento nuevos sistemas de generación.
- Brindan un seguimiento a la carga, combinando respuestas ante los cambios entre el abastecimiento de la electricidad y la demanda.
- Ayudan en la inclusión de fuentes eólicas y solares, disminuyendo la volatilidad de la salida [8][10].

2.3 Consideraciones del Almacenamiento de Energía

La parte principal de un sistema energético se centra en la capacidad de generar la suficiente energía con el propósito de abastecer la demanda a un

precio justo y en correctas condiciones ambientales y de confiabilidad. Es decir, que el almacenaje de energía se ha transformado en un gran reto dentro de la implementación en sistemas energéticos ya que existen varios agentes que pueden provocar problemas en la generación de energía como son la intermitencia en el caso de sistemas fotovoltaicos y la época del año en lo que se refiere a la energía hidroeléctrica y eólica; eso sin tomar en cuenta los cambios que tiene la carga en sí en el sistema [9][11]. En la Tabla 1 se indica algunas aplicaciones de los dispositivos de almacenamiento.

Tabla 1 . Aplicaciones de los dispositivos de almacenamiento

ALTA ENERGÍA	ALTA POTENCIA	
Aplicaciones de administración de energía	Aplicaciones de calidad de potencia y continuidad de servicio	
Tiempos lentos (h)	Tiempos rápidos (m)	Tiempos extra rápidos (s)
Nivelado de carga	Reserva rodante	Compensación del efecto del efecto de parpadeo (flicker)
Integración con fuentes renovables de energía	Sistema de alimentación ininterrumpida	Corrección de hundimiento de tensión
Operación aislada	Black start	
Comercialización	Supervisión de potencia activa y potencia reactiva	

Los requerimientos de los sistemas de almacenamiento cambian dependiendo de la capacidad del sistema eléctrico, esto quiere decir que, si son sistemas de potencia bastante alta, los elementos de almacenamiento deben garantizar que el servicio eléctrico sea continuo (descargas de energía en instantes cortos de tiempo) y mantener la calidad de la energía; por otro lado, en los sistemas de generación distribuida lo esencial es el almacenamiento de energía con el objetivo de entregarla en los instantes en los cuales no está presente la generación [10][11].

Actualmente, existen diferentes clases de elementos que permiten el almacenaje de energía como son los tipos inerciales, las baterías, los condensadores electroquímicos, entre otros. El almacenamiento por bombeo de agua, aire comprimido y térmico son normalmente de gran tamaño que necesitan requerimientos de instalación importantes y los supercondensadores o superconductores son dispositivos de corta duración usados en mayor proporción en aplicaciones que tienen que ver con la calidad de potencia. La ventaja principal de utilizar los sistemas de almacenamiento es la disminución del consumo de combustibles fósiles, también aportan con mejoras en la eficiencia de las micro redes y posibilitan el diferimiento de las inversiones en unidades de generación y transmisión [9][10][11].

Las micro – redes son sistemas que posee una baja inercia en comparación con los sistemas convencionales de generación; frente a variaciones de carga y suministro, la inercia de los generadores de inducción y de los sistemas sincrónicos absorben o entregan una diferencia de potencia entre la parte de generación y la demanda. En la conexión a red, la estabilidad tiene que ver con la habilidad de adaptar, de forma rápida, la potencia activa o reactiva y así poder controlar las oscilaciones de frecuencia o de tensión. Como la red es una fuente bastante fuerte, todos los sistemas de la micro red deben adaptarse a las operaciones de la red [9][11].

2.4 Métodos de Almacenamiento de Energía

2.4.1 Baterías

Estos dispositivos usados en micro redes son denominados secundarios que ayudan en el proceso de recarga por medio de energía eléctrica revirtiendo así el proceso electroquímico. Su principio de funcionamiento es la reacción entre dos electrodos que se encuentran

apartados por un electrolito, las reacciones que se producen entre los componentes ocasionan una corriente de iones que pasa por el electrolito y genera también una corriente eléctrica entre los electrodos. Las diferentes tecnologías o formas de fabricación delimitan la capacidad, vida útil, tamaño y lo más importante, su costo [11][12][13].

2.4.2 Baterías de Flujo

Su principal cualidad es la independencia entre la energía que puede manejar y su capacidad de potencia. El almacenamiento depende específicamente del número total de electrolitos ocupados y la potencia exclusivamente del área activa de la celda. Los electrolitos son guardados en distintos tanques y circulan por medio de la celda que los separa por medio de una membrana microporosa que posibilita la corriente de iones y gracias a los electrodos, se transfiere como energía eléctrica. En estos dispositivos se producen reacciones del tipo oxidación – reducción y es por esto que también se las conoce como baterías REDOX y entre las diferentes tecnologías de celdas de flujo las más importantes son: Reducción de Vanadio, Zinc – Aire y Zinc – Bromuro [11][12][13].

2.4.3 Supercapacitores

Estos elementos presentan propiedades de baterías y condensadores, con la diferencia que su operación no depende de una reacción y por esta razón, los ciclos tanto de carga y descarga son mayores en comparación con las baterías. Su almacenamiento de energía es en forma de campo eléctrico producido entre dos electrodos. Poseen un electrolito conductor de iones que es el reemplazo de la zona aislante del dieléctrico que posee los conductores y las baterías [11][12][13].

2.4.4 Celdas de Combustible

Es un sistema de acumulación de energía basado en combustibles. Elemento electroquímico que produce electricidad por medio de una fuente externa de combustible que comúnmente es de hidrógeno, pero también puede ser de oxígeno, sin combustión. Estos elementos no se agotan ni tampoco necesitan de ninguna recarga y generarán calor y electricidad mientras se les abastezca de combustible [11][12][13].

2.4.5 Supercapacitores Magnéticos

Supercapacitores Magnéticos: Estos dispositivos almacenan energía por medio de un campo eléctrico producido por un flujo D. C. en una bobina conductora. Dicha bobina es refrigerada de forma criogénica a temperaturas menores a la temperatura de superconducción. Aparte de esta bobina, el sistema está compuesto por un refrigerador criogénico y un sistema de acondicionamiento de potencia. La descarga de la bobina puede devolver la energía almacenada a la red. La parte del acondicionamiento de potencia está integrado por un inversor bidireccional cuya función es extraer energía de la red hacia la bobina e introducir la energía de la bobina en la red. Estos sistemas de almacenamiento de energía también pueden ser conectados, mediante inversores, a una línea de corriente alterna [11][12][13].

2.4.6 Volantes de Inercia

Conocidos también con sus siglas FES que en inglés significan Flywheel Energy Storage. Son dispositivos que acumulan energía por medio de la aceleración de un rotor o volante a velocidades muy altas y esta energía permanece en el sistema como energía de rotación. La velocidad de rotación del volante disminuye cuando la energía es extraída del sistema, esto se da como resultado del principio de conservación de energía y se incrementa la velocidad del volante cuando se inyecta

energía al sistema. Este sistema está constituido por un rotor suspendido por rodamientos y una sección al vacío que evitará rozamientos. Los sistemas más avanzados poseen rotores fabricados en fibra de carbono con una resistencia elevada y suspendidos por campos magnéticos [11][12][13].

2.4.7 Aire Comprimido

Estos sistemas usan la energía comprimida que tiene que ver con el aire presurizado que se encuentra en depósitos subterráneos. El almacenamiento de energía se produce comprimiendo el aire durante todo el tiempo que dure la baja demanda de energía. En cambio, cuando existen altas demandas, este aire eleva su temperatura y se expande por medio de una turbina de combustión para producir energía eléctrica. Este proceso se trata de un ciclo combinado donde la utilización de gas natural para calentar el aire comprimido es mucho menor en comparación con las centrales de gas convencionales para producir energía [11][12][13].

2.4.8 Bombeo Hidráulico

En este sistema, el exceso de energía que existe en los instantes de baja demanda y el incremento de la producción, que puede ser procedente de parques de generación, se utiliza para bombear agua hasta llegar a un depósito situado a una mayor altura y así almacenarla como energía potencial. Cuando existe una demanda extremadamente alta, el depósito libera el agua activando las turbinas hidráulicas que se encuentran adaptadas junto a un generador el cual puede producir electricidad. Estos sistemas tienen la capacidad de cubrir el déficit existente de energía dependiendo de la cantidad de energía almacenada [11][12][13].

2.4.9 Térmica

Para almacenar energía térmica existen dos maneras, la primera es utilizando el

calor sensible y la otra es por medio del uso del calor latente. Aquella que se basa en el calor latente utilizan la transición de líquido a sólido de un material a una determinada temperatura constante. Durante el almacenamiento, dicho material pasa del estado sólido al estado líquido y mientras suceda la recuperación su proceso es contrario, es decir, de líquido a sólido. El paso de calor por medio del acumulador térmico y el ambiente externo se produce por medio de un fluido de transferencia de calor. La temperatura es el factor más importante para la acumulación de energía en esta clase de sistemas, ya que a mayor temperatura la concentración será más alta, es decir, que la entalpía de fusión se incrementa con la temperatura de fusión del material utilizado. El hidróxido de sodio, a pesar que es altamente corrosivo, es un fluido adecuado para lo que respecta al almacenamiento de energía. Los sistemas que tienen que ver con el calor sensible, usan sales fundidas o a su vez aceites sintéticos que guardan energía en forma de calor, el cual es tomado por las centrales termo solares con el fin de generar vapor de agua para poner en marcha el sistema turbo – alternador y así poder entregar potencia de forma moderada en días nublados [12][13].

2.5 Sistemas de Almacenamiento basados en Supercondensadores

Los supercondensadores conocidos como Electrochemical Double Layer Capacitors (EDLC) o también como condensadores electroquímicos son elementos electrónicos pasivos que ayudan en la reserva energética en un tiempo reducido. En el año de 1969 fue su descubrimiento y gracias a sus funciones poco a poco se han encontrado aplicaciones que pueden provocar, de forma significativa, una revolución en el mundo de la industria y de la electricidad. Para entender sobre su funcionamiento, es importante tener en cuenta que la

pseudocapacitancia es el almacenaje de energía por medio de la acumulación de cargas entre las láminas del condensador. Este fenómeno está relacionado con la tensión y por esta razón tiene una capacitancia variable [8][9].

Los supercondensadores tienen características tanto de condensadores como de baterías con la diferencia que su operación no depende específicamente de una reacción electroquímica, y por esta razón la cantidad de ciclos de carga y descarga es mayor en comparación con las baterías. En los supercondensadores, la energía se almacena en forma de campo eléctrico entre electrodos. La parte aislante del dieléctrico se sustituye por un electrolito conductor de iones. El poco tiempo empleado por el movimiento de los iones por medio del electrolito permite obtener grandes niveles de energía a costo mínimo de tensión, en comparación con los condensadores es muy común la conexión en serie para obtener los niveles de tensión nominal de almacenamiento, la intensidad que puede soportar es muy alta ya que el área de los electrodos es mayor con respecto a los del condensador [8][10].

Los supercondensadores poseen mayor tiempo de vida en comparación con los condensadores alcanzando así más de 10 años. Estos dispositivos responden a cargas y descargas rápidas, alcanzando así descargas profundas y sobrecargas con una mayor eficiencia energética (98%) ya que no existe desgaste o calentamiento de materiales. Por otro lado, es muy alta la densidad de potencia de estos dispositivos en lo que se refiere a su contraste con la densidad de energía ya que su descarga es muy rápida en comparación con las baterías. Su costo elevado disminuye su inclusión en usos comerciales, pero en ocasiones su manejo junto con las baterías ayuda a incrementar su vida útil y disminuir su capacidad mientras los supercondensadores se encargan de los picos de carga [8][9].

La principal función de los supercondensadores es mejorar la calidad de potencia de una micro-red; los cortos tiempo de respuesta lo hace importante para trabajar junto con cualquier otro sistema de almacenamiento de energía. También permiten mantener condiciones como la tensión, factor de potencia, frecuencia y reducción de transitorios [8][10].

2.5.1 Funcionamiento y Componentes

El funcionamiento es idéntico al de los capacitores convencionales, el almacenamiento por campos eléctricos se acumula en iones y no existe una transferencia de masa. Esta manera de funcionamiento provoca que su rendimiento sea superior en comparación con la batería que solo se basa en generación de energía por medio de reacciones químicas. La diferencia principal frente a los condensadores radica en el acercamiento de cargas de distinta polaridad dentro del dispositivo a nivel molecular y también el incremento del área efectiva de los conductores [8][11].

Los elementos que conforman los supercondensadores son:

- **Electrodos.** - La cantidad de almacenamiento de un supercondensador es proporcional a la superficie de los electrodos. Los polímeros y óxidos metálicos posibilitan diseñar supercondensadores de una alta energía y potencia específica, pero con un elevado costo ya que se encuentra menos desarrollada dicha tecnología [8][10].
- **Electrolitos.** - Es importante la combinación entre el electrolito y los electrodos; de igual forma la porosidad de estos para que los iones proporcionen una correcta fluencia en su interior. La densidad de energía y el voltaje de la celda son condicionados por la elección del

electrolito que, a su vez, pueden ser acuosos u orgánicos [8][10].

- **Separador Aislante.** - Impide el contacto directo entre los electrodos, pero permite el paso de electrones. Cuando el electrolito es orgánico se utiliza un aislante polimérico y cuando es acuoso es necesario un cerámico. Dentro de sus características es que deben tener una alta resistencia eléctrica, un espesor muy pequeño y una alta conductividad [8] [10].

2.5.2 Características

Las características más importantes que presentan los supercapacitores son:

- Permite cargas y descargas rápidas.
- Posee un alto rendimiento.
- Funciona con corrientes muy altas.
- Larga vida y alta ciclabilidad.
- Bajas necesidades de mantenimiento.
- Puede trabajar con un rango amplio de temperaturas.
- Densidad de energía muy alta.
- Inmunidad frente a golpes y vibraciones.
- Menos contaminantes y más seguros en comparación con las baterías.
- Fácilmente pueden combinarse con las baterías [8][10].

2.5.3 Tipología

Hay diversos tipos de electrolitos que son ocupados en la producción de supercapacitores, hidróxidos de potasio e hidróxidos de sodio, pero actualmente se investiga en nuevos posibles materiales como por ejemplo nanoespumas y nanotubos de carbono. El aumento de la resistencia interna del dispositivo es provocado por la densidad de los elementos internos del mismo. Los supercapacitores pueden dividirse en función tanto de los elementos que lo componen como también por sus características internas [9][13].

- Supercapacitores Electrolíticos. - Los electrolitos para este modelo de supercondensador pueden ser de hidróxido de sodio o de potasio, donde el electrolito se separa en cationes de potasio o sodio por la variación de potencial de los elementos internos que forman parte de la energía con la que el condensador se carga [11][13].
- Supercapacitores no Electrolíticos. - Los principales son aquellos creados por medio de carbón activo, nanotubos de carbono, aerogeles y soles. Los aerogeles son materiales muy parecidos al gel donde su parte líquida es reemplazada por un gas con el fin de disminuir la densidad del componente, es un gran aislante por lo que es ideal utilizarlo de forma interna en los supercapacitores; los soles son elementos sólidos inmersos en un líquido con un movimiento browniano el cual permite el almacenamiento de energía. Para la producción de soles es necesario la fusión de un óxido de un metal en agua expuesta a temperaturas muy altas, luego es gelado por medio de la deshidratación o también aumentando el pH de dicho compuesto, el resultado será un material homogéneo que proporcionará una gran capacitancia [11][13].
- Supercapacitores con Pseudocapacitancia Redox. - Para la producción de estos dispositivos se utiliza el óxido de cobalto, óxido de litio, dióxido de magnesio, dióxido de iridio y dióxido de rutenio. Para la creación de este tipo de supercondensadores se utiliza un proceso similar al de la creación de soles, pero adicional a eso, también se puede obtener por medio de la descomposición de un óxido metálico por medio del ciclo del electrólisis. Con el óxido de rutenio se ha logrado alcanzar capacitancias

muy altas, pero no es rentable en comparación con aquellos supercondensadores producidos a partir del óxido de níquel que a pesar de brindar un nivel de capacitancia menor son más asequibles en lo que se refiere a costos. Una manera de producir la estructura porosa es combinar el óxido de litio sobre un metal que puede ser el platino y para retirar el litio se aplica un ácido que lo hará de forma sencilla [11][13].

- Supercapacitores de Polímeros Conductores. - Los polímeros conductores son sustancias orgánicas capaces de transportar electricidad de forma muy similar a la conducción por medio de un metal, posee una alta capacidad de reversibilidad entre el conductor y no conductor. Entre los polímeros más utilizados para la elaboración de los supercapacitores son el polipirrol, la polianilina y el politiofeno; los cuales poseen una alta densidad de energía [11][13].

2.5.4 Aplicaciones

La creación de los supercondensadores ha permitido desarrollar e implementar nuevas tecnologías y aplicaciones teniendo entre las más importantes las siguientes:

- Energías Renovables Fotovoltaicas
Dentro de un sistema fotovoltaico, los supercapacitores, son utilizados en paralelo para poder estabilizar el voltaje de salida de las células y también para que los picos de tensión disminuyan. Además de estas ventajas, los sistemas fotovoltaicos han empleado baterías como un sistema de almacenamiento de energía solar, los cuales deben ser cambiados dentro de 3 a 7 años ya que van perdiendo su ciclabilidad y por lo tanto su capacidad. Los supercapacitores, aparte de que tienen una mayor vida útil, poseen una mayor eficiencia de carga que las baterías (pérdida de energía en la

carga: batería 30% y supercapacitor 10%) [8][11].

Adicional a eso, los supercapacitores, presentan un factor importante para su elección que es su amplio rango de temperatura de trabajo. La razón más significativa por la que estos dispositivos dejan de ser una opción es su baja densidad de energía en comparación con las baterías, ya que para un mismo espacio de almacenamiento se tendría una cantidad de energía almacenada mucho menor y a un mayor costo. Pero su operación de forma combinada ha logrado ampliar la vida de las baterías sin realizar algún sobredimensionamiento y brindando una alta potencia y densidad de energía. Para que la potencia de ambos sea manejable es necesario implementar convertidores de potencia bidireccionales [8][13].

- Energías Eólicas

En el caso de los sistemas eólicos, los supercondensadores pueden ser empleados como alimentación para controlar los ángulos que generan las palas de los aerogeneradores. Cada una de estas palas tiene un servomotor que funciona por medio de unas baterías, y gracias a esto las aspas se pueden mover en un determinado ángulo. Comúnmente, siempre se ha utilizado como alimentación a las baterías, pero los pulsos de potencia que necesita este movimiento ha provocado que ciertos especialistas sobredimensionen dichas baterías. Para estos sistemas es importante tomar en cuenta también la vida útil de las baterías, su mantenimiento y el difícil acceso que estas tienen. Es por esta razón que la nueva generación de aerogeneradores posee supercapacitores que reemplazan a las baterías y realizan la misma función de control angular de alabeo [8][10][11].

Entre otras aplicaciones que utilizan supercondensadores como dispositivos de acumulación de energía se tiene a la automoción y transporte pesado, el sistema de alimentación ininterrumpida (UPS o SAI), los sistemas microelectrónicos, los sistemas de transferencia de potencia y las grúas y ascensores [8][11].

3 Micro-redes

Una micro-red se encuentra situada junto a una subestación que posee una cierta cantidad de cargas con diversos sistemas de almacenamiento con distintas formas de operar y diferentes capacidades. El lugar de conexión a la red se lo conoce como punto de acoplamiento común y da paso a una leve transición entre el modo conectado y desconectado, además permite la sincronización cuando existe la reconexión a la red de distribución. Estos sistemas pueden operar de forma aislada de la red cuando el sistema de transmisión no llega a ciertas regiones, a esto se lo conoce como modo aislado. La micro-red produce electricidad para proveer sus requerimientos, existen tecnologías que producen residuos en forma de calor, específicamente, en las turbinas donde el que vapor que desecha se puede utilizar para calefacción produciendo un sistema de calor que eleva su eficacia. La investigación de diferentes técnicas, el avance en las conexiones y el aumento de nuevos métodos de almacenaje han sido puntos importantes para fijar a las micro-redes como el avance que se necesitaba para el desarrollo de los sistemas eléctricos [14][15][16].

3.1 Ventajas y Beneficios de una micro-red

- Las micro-redes se pueden considerar como sistemas de generación que pueden operar como una central convencional, ofreciendo prestaciones al sistema al cual se encuentra enlazado, pero a su vez

estos también deben ser liquidados [15][16].

- Estos sistemas abastecen las cargas acopladas en una determinada zona factible en el tiempo en que el sistema principal no puede proveer. [15][16].
- Permiten el ingreso de diferentes tipos de generación a la red e incrementa la matriz energética brindando así una mayor continuidad y alta confiabilidad en la generación [15][16].
- Las intermitencias en lo que respecta a transmisión disminuyen, la utilización del sistema principal se optimiza de forma correcta y el gasto de energía es reducido cuando se ocupa las fuentes renovables existentes en un área determinada. Los sistemas pueden producir subproductos como vapor o calor y estos se usan en aplicaciones comerciales, residenciales e industriales [16].

3.2 Inconvenientes para implementar una micro-red

- La micro-red posee un diagrama diferente cuando este se conecta o se desconecta al sistema principal y su diferencia es la potencia de cortocircuito. La generación entre los ramales secundarios de la red necesita obligatoriamente que todas las protecciones sean direccionales. En conclusión, es necesario que se adopte sistemas más complejos de protección [15][16].
- Para el circuito íntegro de una micro-red se necesita varios equipos y elementos de comunicación, adquisición y procesamiento de información lo que ocasiona que los costos de implementación se eleven [15][16].
- La comunicación es el elemento más importante dentro de la operación porque se encuentran en tiempo real todas las acciones de control y se

encuentran en función de los datos generados por el sistema principal; esto no se podría lograr si existiese un sistema poco confiable[15][16].

- Las micro-redes se desarrollan en paralelo en diversos lugares de investigación que se encuentran alrededor del mundo, por esta razón, cada elemento o equipo posee un gran número de normas, formatos y requerimientos que complicarán la unificación de los estándares [15][16].

3.3 Objetivos de una micro-red

La micro-red es una solución inteligente para la inclusión y el control de la generación distribuida que sustenta a las cargas, a lo largo de las etapas de planificación y diseño se deben fijar requerimientos y metas a implantarse en el sistema, algunos de estos son [15][17]:

- Utilizar en la zona de emplazamiento todas las fuentes energéticas disponibles.
- Las cargas de la micro-red deben darse al menor costo posible y con altos parámetros de calidad.
- Precisar las conexiones con el sistema principal y abastecerles con una suficiente sincronización.
- Situar y dimensionar el tipo de almacenamiento de energía.
- Actuar de forma eficiente y dinámica frente a transformaciones existentes en el sistema [15][17].

3.4 Arquitectura de una micro-red

3.4.1 Almacenamiento Distribuido

Son aquellos elementos o dispositivos que almacenan energía en diferentes formas, ya sean estas químicas, magnéticas, entre otras. Existen diferentes tipos de elementos utilizados como sistemas de almacenamiento y entre estos se encuentran volantes de inercia, baterías, almacenadores magnéticos, almacenadores de aire comprimido, supercondensadores,

almacenadores de hidrógeno, entre otros [16][18].

3.4.2 Cargas de la Micro - red

El objetivo de una micro-red es que las cargas residenciales, comerciales e industriales puedan ser servidas con altos parámetros de calidad y a costos reducidos. Si la red opera de forma aislada o en modo desconectado, es necesario un esquema de alivio de carga; es importante indicar que este esquema también es una alternativa para el modo conectado, pero tomando en cuenta consideraciones especiales [16][18].

3.5 Operación de una micro-red

- Los sistemas aislados provienen de la generación de energía obtenida de elementos externos o específicamente de combustibles que son factibles para su almacenamiento y transporte. Las fuentes renovables tienen como ventaja el empleo de energías proporcionadas por los recursos que existen de forma abundante en el entorno y que pueden ser una alternativa viable para aquellas zonas donde es complicado transportar ciertos combustibles. En este ámbito, las micro-redes son una opción para dirigir de forma eficiente la generación y ayudar con el control de los almacenadores. [17] [18][19].
- La micro-red se une al sistema por medio de un PAC (punto de acoplamiento común), el cual brinda la posibilidad de desconectar la red siempre y cuando disminuya la condición del suministro por debajo de la condición inicial definida y también cuando el régimen de control de la micro-red lo ordene. Cuando se encuentra la micro-red conectada a la red, esta trata de abastecer casi a toda la demanda, maneja los tiempos de cargas del almacenamiento distribuido de tal forma que la red trabaje como un nodo slack entregando las

diferencias de energía. Adicional a eso, la conexión proporciona una relación de frecuencia y tensión que mantiene ciertos parámetros en la micro-red. La desconexión del sistema principal es habilitado cuando este proporcione un abastecimiento con energía de poca calidad ya que no cumplen con las expectativas de carga algunos parámetros del sistema [17] [18][19].

4 Estabilidad de Frecuencia

Este tipo de estabilidad está relacionado con la respuesta del sistema ante cualquier perturbación severa y que, a su vez, provocan variaciones significativas de frecuencia, de tensión y de flujos de potencia provocando así la activación de los sistemas de protección y de control que son modelados en estabilidad transitoria. También se relaciona con la capacidad para conservar una frecuencia de estado estacionario después de una perturbación que provoque una alteración tanto en carga como en generación [20][21].

4.1 Respuesta del sistema ante perturbaciones severas

Existe un modelo referente a las perturbaciones que ocasionan el paso desde el estado de alerta al de operación externa. Actualmente, los sistemas funcionan de tal manera que su operación es bastante segura frente a perturbaciones. Los sistemas de control y protección actúan para evitar la expansión de perturbaciones de cualquier parte del sistema. La unión inusual de circunstancias y eventos puede ocasionar que una parte del sistema se disocie formando una o más islas eléctricas con una importante pérdida de carga. Generalmente, los motivos que provocan la inestabilidad de frecuencia son perturbaciones extremadamente severas en comparación con las de diseño [21][22].

El aislamiento entre islas provoca una variación transitoria y sostenida de frecuencia, donde el suministro de energía y los elementos de control cumplen un rol importante en el desempeño dinámico de todo el sistema. La frecuencia de las islas con déficit de generación disminuye y si no existe la reserva rotante suficiente esta alcanza valores bajos a los cuales se desconectan las unidades térmicas por actuación por subfrecuencia de las protecciones. También disminuye la carga a una cantidad que puede ser suministrada de forma satisfactoria por la generación. En cambio, en el caso de las islas con superávit de generación, su frecuencia disminuye, los reguladores de velocidad reaccionan al incremento de frecuencia mermando la potencia mecánica que se genera gracias a las turbinas. La operación de la isla depende de la capacidad que tiene las unidades de generación para soportar el rechazo parcial de la carga. En el momento que las islas logran las condiciones de operación en estado estacionario se realiza un reajuste de carga y generación en cada isla, al igual que la reparación de todos los equipamientos [21][22][23].

4.2 Naturaleza de los problemas de estabilidad de frecuencia

La frecuencia relacionada específicamente a la estabilidad de un sistema es la capacidad para lograr un aceptable estado estacionario de operación luego de una perturbación severa. Esto produce grandes variaciones de frecuencia y de tensión. Los procesos y elementos que se encuentran activos por causas de dichas variaciones poseen tiempos de actuación que se encuentran en el rango de los algunos segundos hasta unos minutos [24][25].

El periodo de interés alarga el periodo transitorio para incorporar dinámicas lentas de los sistemas de control tanto de protección como automático. La estabilidad de frecuencia comprende la

simulación de perturbaciones que generan una cascada de elementos llevando a la conformación de islas. También se encuentra asociada en el caso de que si cada isla logra o no alcanzar un estado aceptable para su operación con pequeñas pérdidas de generación y de carga. Normalmente, las dificultades que se presentan en la estabilidad de frecuencia se dan por la escasa coordinación que tienen los sistemas de protección y control; también por la mala respuesta del equipamiento y por la escasa reserva de potencia tanto activa como reactiva [26][27].

5 Estabilidad de Voltaje

La estabilidad de voltaje es la capacidad de un sistema para conservar las tensiones estables en todas las barras después de haber pasado por una serie de perturbaciones a partir de un punto inicial de operación llamado caso base y esto depende de la capacidad para conservar y restablecer un equilibrio adecuado entre la demanda y la generación. Un sistema se encuentra en inestabilidad de tensión cuando una perturbación, ya sea esta de carga o por cambios de las condiciones del sistema, provocan variaciones de voltaje en algunas barras [27] [28].

Su principal causa es la incapacidad que tiene el sistema para abastecer la demanda de energía reactiva, sin embargo, el centro de dicho problema es específicamente la caída de tensión que sucede en el momento que las potencias tanto activa como reactiva fluyen a través de reactancias inductivas que se encuentran asociadas con las redes de transmisión. Un juicio sobre la estabilidad de voltaje señala que, en condiciones de operación de todas las barras del sistema, la magnitud del voltaje de la barra (V) incrementa tanto como la inyección de potencia (Q) también es incrementada en la barra, con esto se puede deducir que un sistema tiene inestabilidad de voltaje si la magnitud de la tensión en la barra decrece tanto como

la inyección de potencia reactiva es incrementada [27][29].

Los resultados que se pueden obtener por la falta de estabilidad de voltaje es la reducción de la carga en una determinada zona o problemas en la transmisión, así como también los demás elementos involucrados por la actuación de las protecciones; esto ocasiona salidas de operación en cascada que pueden llevar a que los generadores tengan pérdidas de sincronismos. Un sistema que tenga dificultades en su estabilidad de ángulos puede dar paso a problemas de estabilidad de voltaje o un sistema que pase por un colapso de voltaje puede llevar de forma eventual, a una separación angular de los generadores [29][30].

gran explosión de corriente de la batería degrada su vida útil. Una alternativa es combinar las baterías con un elemento de alta densidad de potencia capaz de suministrar la corriente transitoria como un supercondensador. En dicho sistema híbrido, la batería cumple con el suministro de energía continua, mientras que el supercondensador proporciona el suministro de energía instantánea a la carga. El sistema propuesto en este modelo es una micro-red que posee elementos de reserva de energía híbridos de supercondensador de batería fotovoltaica independiente.

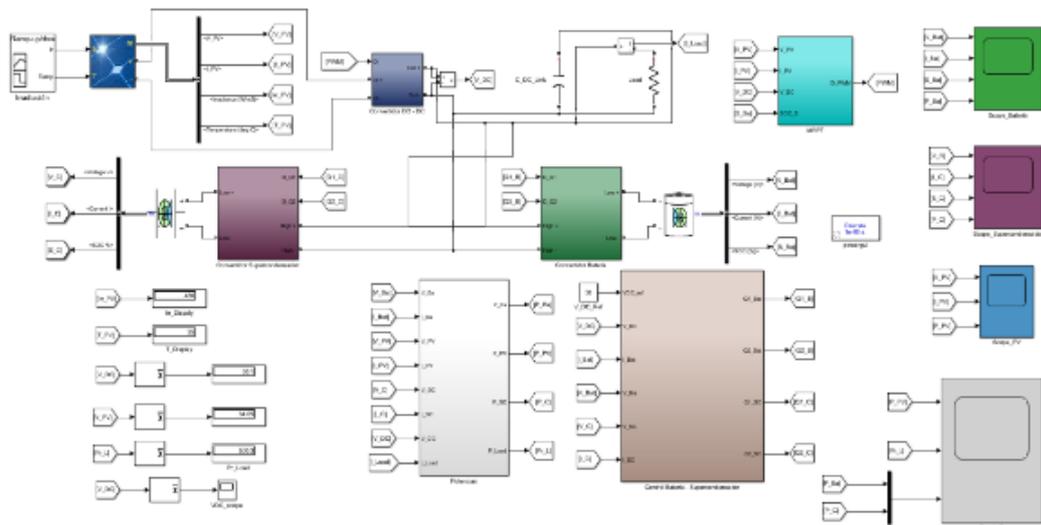


Figura 2. Diseño de una micro – red en Matlab - Simulink

6 Planteamiento del Problema

Con el objetivo de almacenar el exceso de energía producida por las altas irradiaciones en un determinado tiempo, o para mantener el suministro estable de energía y así abastecer la demanda de carga durante el tiempo de baja irradiación, se empleará un dispositivo de acumulación o reserva de energía. Las altas densidades de energía que caracterizan a las baterías las transforman en una alternativa adecuada para un suministro de energía constante, pero una

7 Resultados y Discusión

En la micro-red, el sistema híbrido conformado por la batería y el supercondensador proporcionan inyección de voltaje y corriente a todo el sistema como se señala en las Figuras 3 y 5.

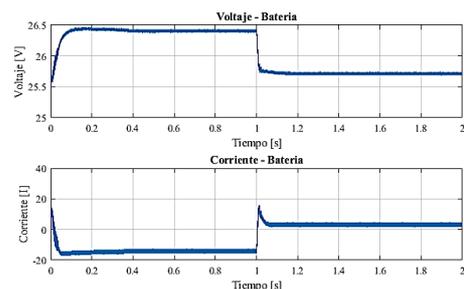


Figura 3. Voltaje y Corriente de Salida de la Batería.

Y gracias a esta inyección de voltaje y de corriente, permite también entregar potencia que varía en el tiempo de 1 segundo como se indica en la Figura 4 y Figura 6.

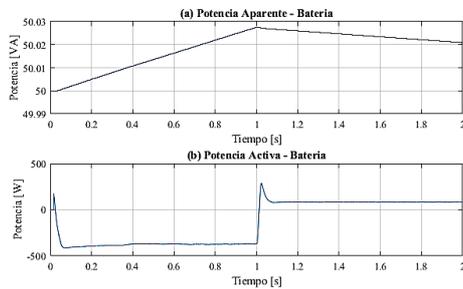


Figura 4. Potencias de Salida de la Batería. (a) Potencia Reactiva (b) Potencia activa.

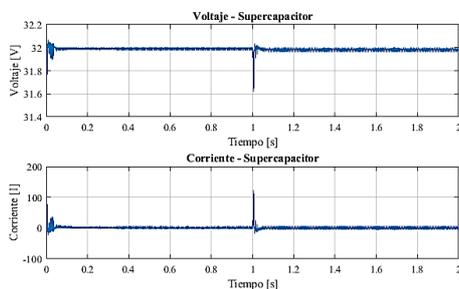


Figura 5. Voltaje y Corriente de Salida del Supercondensador.

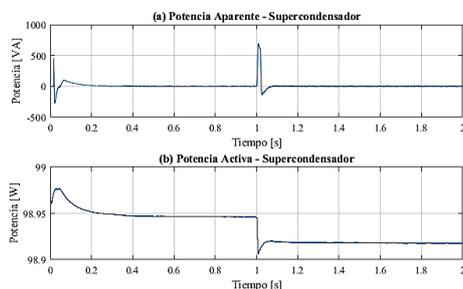


Figura 6. Potencias de Salida del Supercondensador. (a) Potencia Reactiva (b) Potencia activa.

Se simula que a los 0.3 milisegundos se produce una perturbación severa de aproximadamente 6 milisegundos, la cual ocasiona una inestabilidad tanto de voltaje como de frecuencia en el sistema. Durante la falla, el supercondensador entra en operación brindando así la estabilidad de la micro-red (Figura 7 y Figura 8). En las cuales se indica que el voltaje oscila y se estabiliza en 1.1 p.u. y la frecuencia regresa a 60 Hz.

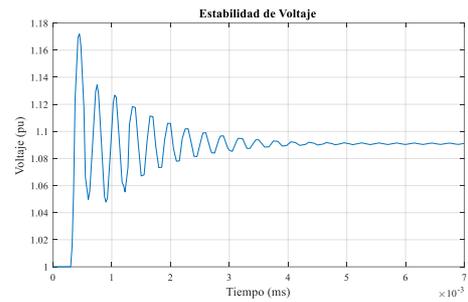


Figura 7. Inestabilidad y Estabilidad de Voltaje durante y después de una perturbación.

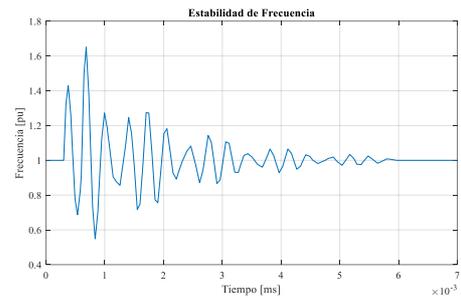


Figura 8. Inestabilidad y Estabilidad de Frecuencia durante y después de una perturbación.

8 Conclusiones

La gran dificultad de los sistemas de energía es su capacidad de almacenamiento, en especial cuando su fuente de energía es aislada e intermitente de su sitio de consumo. Algo parecido a ello es la unión de todos los diferentes sistemas tomando en cuenta sus características de operación como la capacidad de almacenamiento, la velocidad de respuesta o la densidad energética.

La inserción de los distintos dispositivos de reserva en una micro-red proporciona ventajas como: el aumento de la potencia instantánea, mejora de los transitorios y mejora de la capacidad, además, posibilita la integración de sistemas de energía renovables.

Los elementos almacenadores de energía dentro de los sistemas de energía renovables han logrado alcanzar una madurez suficiente para poder ser usados a la par con centrales convencionales de grandes proporciones, pero en ocasiones la incorporación de estos dispositivos ha creado algunas dificultades o problemáticas en especial cuando se

basan en fuentes de energía variable como son los aerogeneradores.

Todas las diversas maneras o métodos de almacenamiento energético son apropiados para la generación de energía, pero es importante tomar en cuenta su viabilidad tanto tecnológica como económica. Para lograr un mayor aprovechamiento de la energía y abastecer todas las aplicaciones es necesario implementar varios sistemas de almacenamiento con diferentes características de operación.

Los supercondensadores son sistemas de almacenamiento moderno que, en la actualidad y también en un futuro, prometen ser de gran importancia para la acumulación masiva de energía procedente de sistemas de energía renovables. Su alto rendimiento, el almacenamiento de energía a largo plazo y su no generación de efectos térmicos ni magnéticos hacen que los supercondensadores sean una opción viable para la operación dentro de los sistemas energéticos. Estos elementos, al igual que los demás sistemas de almacenamiento, también poseen desventajas como es la necesidad de tener temperaturas bajas para la criogenización del sistema y el costo inicial de almacenamiento. Este método aún se encuentra en desarrollo y con el pasar de los años se podrá fijar un modelo comercial del mismo.

Los supercondensadores, frente a otros sistemas de almacenamiento, soportan ciclos de carga y descarga muy elevados y su costo podría ser accesible sin tomar en cuenta todo su sistema de control. A pesar de eso, son capaces de nivelar con rapidez las fluctuaciones bruscas y se han convertido en una posible solución para disminuir en la red, ciertas perturbaciones de frecuencia que podrían existir.

9 Trabajos Futuros

El presente trabajo es una base para determinar posibles líneas futuras de investigación. Cabe recalcar que es

necesario nuevas tecnologías o mejoras significativas para que los supercondensadores sean el principal sistema de almacenamiento de energía y para esto es importante obtener modelos para caracterizar a los supercondensadores en todas sus regiones de funcionamiento. Además, es esencial que estos dispositivos puedan operar en conjunto con otros sistemas para conseguir una mayor duración en el almacenamiento. El tema del costo de implementación de estos dispositivos es también importante y para esto es necesario el estudio de los elementos de control que constituyen a los supercondensadores para que de esta manera se puede reducir en cierta proporción su precio. La implementación de supercondensadores de grafeno podrían ser una opción para reemplazar la utilización de baterías en lo que respecta a la movilidad ya que son una alternativa de carga rápida y almacenaje que podrá revolucionar todos los sistemas convencionales normalmente utilizados. En lugar de mantener la electricidad como potencial químico como lo hace la batería, los supercondensadores almacenarán dicha energía en un campo eléctrico de forma similar a la acumulación estática de un globo. Como no existe reacción química no se deterioran como usualmente sucede con las baterías de iones de litio. Pero existen razones por las que aún los supercondensadores no han podido reemplazar a las baterías dentro de los sistemas de movilidad eléctricos y electrónicos, una de esas es que poseen poca energía en la misma cantidad de espacio y no pueden tenerla almacenada por mucho tiempo. Tal vez esa cantidad de energía sea útil para un bus de transporte, pero no tanto para un auto que circula todo el día. Con las investigaciones pertinentes, se podrá implementar nuevos modelos de supercondensadores y así mejorar la movilidad a nivel mundial.

10 Referencias

- [1] S. Hoyos, C. J. Franco, and I. Dyner, "Integración de fuentes no convencionales de energía renovable al mercado eléctrico y su impacto sobre el precio," *Ing. y Cienc.*, vol. 13, no. 26, pp. 115–146, 2017, doi: 10.17230/ingciencia.13.26.5.
- [2] G. J. M. Chicharro, "Sistemas De Almacenamiento De Energía," *Ing. y Cienc.*, no. November 2012, pp. 1–133, 2016.
- [3] Shahid, A. (2018). Smart Grid Integration of Renewable Energy Systems. *7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2018*, 5(Ii), 944–948. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566827>.
- [4] Senapati, M. K., Pradhan, C., Samantaray, S. R., & Nayak, P. K. (2019). Improved power management control strategy for renewable energy-based DC micro-grid with energy storage integration. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(6), 838–849. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5019>
- [5] Molotov, P., Vaskov, A., & Tyagunov, M. (2018). Modeling Processes in Microgrids with Renewable Energy Sources. *Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018*, 203–208. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544313>
- [6] Nayanatara, C., Divya, S., & Mahalakshmi, E. K. (2018). Micro-Grid Management Strategy with the Integration of Renewable Energy Using IoT. *7th IEEE International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2018*, 160–165. <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2018.8525205>.
- [7] I. G. MERA, "Diseño De Un Sistema De Almacenamiento De Energía Híbrido Basado En Baterías Y Supercondensadores Para Su Integración En Microredes Eléctricas Autor:," *Esc. Técnica Super. Ing.*, p. 52, 2010.
- [8] G. J. Martín Chicharro, "PPT: Sistemas De Almacenamiento De Energía," *Presentation*, pp. 1–133, 2016.
- [9] G. L. Álvarez, "Autor: Guillermo López Álvarez Tutor: Alejandro Marano Marcolini," *Ing. Eléctrica*, p. 108, 2017.
- [10] Wang, Z., Luo, D., Li, R., Zhang, L., Liu, C., Tian, X., Li, Y., Su, Y., & He, J. (2017). Research on the active power coordination control system for wind/photovoltaic/energy storage. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2017 - Proceedings, 2018-January*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EI2.2017.8245403>
- [11] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, "Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes," *Inf. Tecnol.*, vol. 25, no. 2, pp. 175–188, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000200020.
- [12] F. J. D. E. Caldas and I. Eléctrica, "Proyecto de Grado Autores : Luis Carlos Hernández Tocora PhD . Cesar Leonardo Trujillo Codirigido por: MSc . Eider Alexander Narváez Director :," *Fac. Ing.*, p. 85, 2018.
- [13] Á. C. Sanchez, "Sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y supercondensadores," *Univ. Alcalá*, p. 136, 2016.
- [14] J. M. Mauricio and A. Marano-

- Marcolini, “El Almacenamiento de Energía en la Distribución Eléctrica del Futuro,” *Real Acad. Ing.*, pp. 87–102, 2017.
- [15] R. D. Medina, “Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad,” *Ingenius*, no. 12, pp. 15–23, 2014, doi: 10.17163/ings.n12.2014.02.
- [16] C. Bordons, F. García-Torres, and L. Valverde, “Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable,” *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 12, no. 2, pp. 117–132, 2015, doi: 10.1016/j.riai.2015.03.001.
- [17] J. de Alaminos *et al.*, “Estudio sobre las microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales,” *Energ. sin Front.*, p. 124, 2014.
- [18] Sanjeev, P., Padhy, N. P., & Agarwal, P. (2018). A New Architecture for DC Microgrids using Supercapacitor. *2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2018, 1*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2018.8447623>.
- [19] H. F. C. C, F. A. M. M, J. Posada, and C. J. Quintero, “Microrredes : Una Revisión del Estado Actual,” *Autom. Electron. Dep.*, p. 5, 2016.
- [20] Abu-Elzait, S., & Parkin, R. (2019). Economic and Environmental Advantages of Renewable-based Microgrids over Conventional Microgrids. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2019.8767146>
- [21] L. Bruno, “Estabilidad de Frecuencia,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- [22] N. Gómez Molina and S. R. Rivera Rodríguez, “Regulación de frecuencia en sistemas de potencia que integran fuentes de energías eólicas mediante un controlador PI e imitación de inercial,” *Ing. Solidar.*, vol. 13, no. 23, pp. 7–28, 2017, doi: 10.16925/in.v23i13.1981.
- [23] B. V. Toro Tovar, E. Mojica Nava, and S. Rivera, “Mejoras de la Regulación de Frecuencia Utilizando el Aumento de Inercia de Microrredes Interconectadas,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 35–42, 2017, doi: 10.18273/revuin.v16n2-2017003.
- [24] P. Ledesma, “Regulación de frecuencia y potencia,” *Univ. Carlos III Madrid*, pp. 1–33, 2008.
- [25] J. G. Calderón-Guizar, “Estudios de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos industriales con generación propia interconectados con el sistema de transmisión,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 11, no. 4, pp. 445–451, 2010, doi: 10.22201/fi.25940732e.2010.11n4.038.
- [26] E. M. Samaniego Rojas, “Detección De Áreas Débiles Respecto a La Estabilidad De Tensión En Tiempo Real Utilizando Lógica Difusa,” *Univ. Cuenca*, p. 139, 2013.
- [27] Á. A. Recalde, “Estabilidad De Los Sistemas De Potencia,” *Electrónica - UNMSM*, vol. 0, no. 10, pp. 32–38, 2002.
- [28] J. E. Candelo, G. Caicedo, and F. Castro, “Métodos para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas de potencia,” *Inf. Tecnol.*, vol. 19, no. 5, pp. 97–110, 2008, doi: 10.1612/inf.tecnol.3963it.07.
- [29] C. J. Zapata, “Índices Para Detectar En Tiempo Real Problemas De Estabilidad De Voltaje,” *Univ. Tecnológica Pereira*, vol. 16, no. 44, pp. 19–24, 2010, doi:

10.22517/23447214.1747.

- [30] D. A. Gómez Bedoya,
“Metodología para el análisis de
estabilidad de tensión mediante la
división de redes en áreas de
control.,” *Univ. Nac. Colomb.*, p.

1.1 Matriz del Estado del Arte

Tabla 2. Matriz de estado del arte

EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE MICROREDES																				
DATOS				TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistemas de Energía Renovables	Sistemas de almacenamiento de energía	Supercondensadores	Micro-redes	Estabilidad de una micro-red	Almacenamiento de energía en los sistemas renovables	Abastecimiento de la demanda	Estabilidad de frecuencia y voltaje	Desventajas de los sistemas de almacenamiento de energía	Operación y funcionamiento de los supercondensadores	Perturbaciones severas o fallas en una micro-red	Viabilidad de los sistemas de almacenamiento	Importancia del almacenamiento de energía	Mejoramiento del funcionamiento de una micro-red	Integración de supercondensadores en micro-redes	Mejoramiento de la eficiencia y calidad de energía entregada	Nuevas tecnologías de almacenamiento de energía
1	2017	Integración de fuentes no convencionales de energía renovable al mercado eléctrico y su impacto sobre el precio	43	X	X	X	o	O	X	o	o	X	o	o	X	o	o	o	o	o
2	2012	Sistemas de almacenamiento de energía	24	X	X	X	X	O	X	o	o	X	X	o	o	X	o	X	o	o
3	2018	Smart Grid Integration of Renewable Energy Systems	0	X	X	o	o	O	X	X	o	o	o	X	o	o	o	o	o	o
4	2018	Improved power management control strategy for renewable energy-based DC micro-grid with energy storage integration	13	X	o	o	o	O	X	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
5	2018	Modeling Processes in Microgrids with Renewable Energy Sources	14	X	o	o	o	O	X	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
6	2018	Micro-Grid Management Strategy with the Integration of Renewable Energy Using IoT	0	X	o	o	o	O	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
7	2013	Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicación en microredes	32	o	X	X	X	X	X	X	o	X	X	o	X	o	X	X	X	X

8	2016	Sistemas de almacenamiento de energía	25	o	X	X	o	O	X	o	o	X	X	o	X	X	o	X	o	X
9	2017	Planificación de sistemas de almacenamiento para la integración óptima de renovables en sistemas eléctricos	17	X	X	X	o	O	X	o	o	X	X	o	X	X	o	X	o	o
10	2017	Research on the Active Power Coordination Control System for Wind/Photovoltaic/Energy Storage	96	X	X	o	o	O	X	o	o	o	o	o	o	o	o	X	X	o
11	2010	Diseño de un sistema de almacenamiento híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microrredes eléctricas	16	o	X	X	X	X	o	o	o	X	X	o	X	X	X	X	X	X
12	2018	Simulación de sistemas híbridos de almacenamiento de energía aplicados en microrredes eléctricas	60	o	X	X	X	X	X	o	o	X	X	o	X	X	X	X	X	X
13	2016	Sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y supercondensadores	8	o	X	X	X	O	X	o	o	X	X	o	X	X	o	X	o	o
14	2017	El almacenamiento de energía en la distribución eléctrica del futuro	176	X	X	X	o	O	X	o	o	o	X	o	X	o	o	o	o	X
15	2014	Microrredes basadas en electrónica de potencia: Características, operación y estabilidad	31	o	X	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	o	X	o	X	X
16	2015	Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable	65	o	o	o	X	X	o	X	o	o	o	X	o	o	o	o	X	o
17	2016	Estudio sobre las microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales	20	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	o	X	o	X	o
18	2018	A New Architecture for DC Microgrids using Supercapacitor	66	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	o	X	o	X	o
19	2016	Microrredes: Una revisión del estado actual	15	o	o	o	X	O	o	o	o	o	o	X	o	o	o	o	X	o
20	2019	Economic and Environmental Advantages of Renewable-based Microgrids over Conventional Microgrids.	18	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	o	X	o	X	o
21	2014	Estabilidad de frecuencia	3	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	o	o	o	o	o
22	2017	Regulación de frecuencia en sistemas de potencia en sistemas de potencia que integran fuentes de energía renovables, mediante un controlador PI e imitación inercial	32	o	o	o	X	O	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
23	2017	Mejoras de la regulación de frecuencia utilizando el aumento de inercia de microrredes interconectadas	17	o	o	o	X	X	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	X	o
24	2008	Regulación de frecuencia y potencia	10	o	o	o	X	O	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	X	o
25	2009	Estudios de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos industriales con generación propia interconectados con el sistema de transmisión	8	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	o	o	o	X	o	o	o

26	2013	Detección de áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión en tiempo real utilizando lógica difusa	28	o	o	o	X	X	o	o	o	o	o	X	o	o	X	o	o	o
27	2014	Estabilidad de los sistemas de potencia: Problemáticas en escenarios complejos	3	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	o	o	o	o		X	o
28	2008	Métodos para el estudio de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	110	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	o	o	o	o	o	o	o
29	2010	Índices para detectar en tiempo real problemas de estabilidad de voltaje	35	o	o	o	X	X	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	X	o
30	2014	Metodología para el análisis de estabilidad de tensión mediante la división de redes en áreas de control	49	o	o	o	X	X	o	o	X	o	o	X	o	o	X	o	X	o
CA NTI DA D:				9	12	9	21	16	12	6	12	8	8	8	6	13	8	15	6	

1.2 Resumen de Indicadores

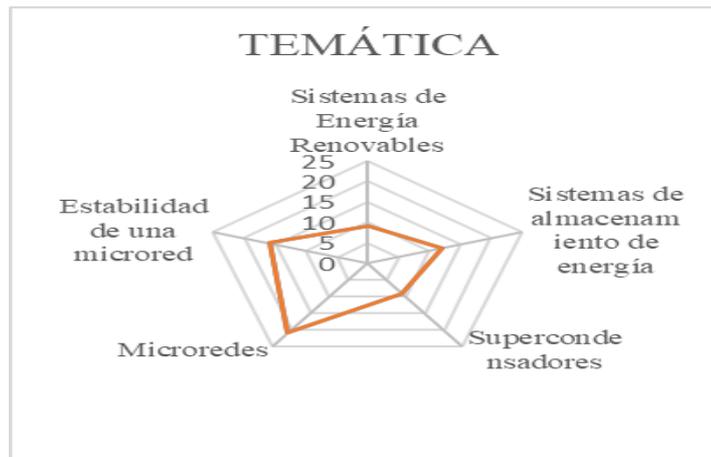


Figura 9. Indicador de la Temática – Estado del Arte



Figura 10. Indicador Formulación del Problema

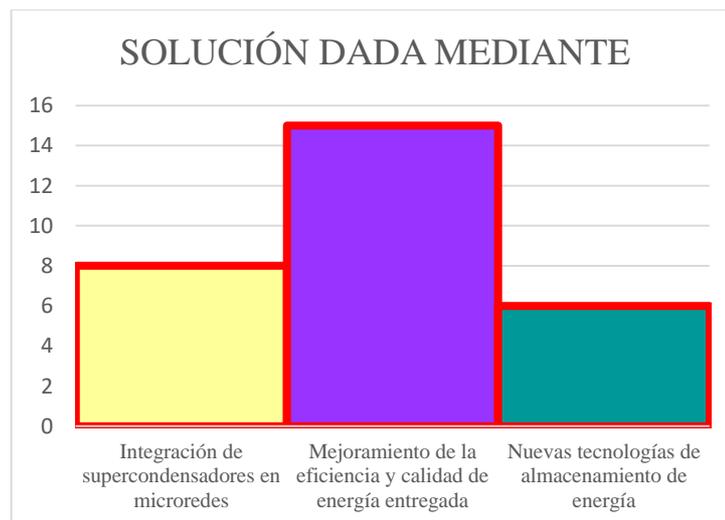


Figura 11. Indicador de Solución – Estado del Arte