

**MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN EN SISTEMAS DE
ALMACENAMIENTO PARA MICRO-REDES**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN EN SISTEMAS DE
ALMACENAMIENTO PARA MICRO-REDES**

**AUTOR:
ANGEL ANIBAL SAMANIEGO INTRIAGO**

**TUTOR:
JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO**

Quito, Marzo 2020

Angel Anibal Samaniego Intriago

MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PARA MICRO-REDES.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Angel Anibal Samaniego Intriago (Y'1987). Realizó sus estudios secundarios y superiores en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico, donde se graduó como Tecnólogo en Mecánica Industrial año 2013 ciudad de Quito-Ecuador. Actualmente egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. asamaniegoi@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

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PARA MICRO-REDES” realizado por Angel Anibal Samaniego Intriago, 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

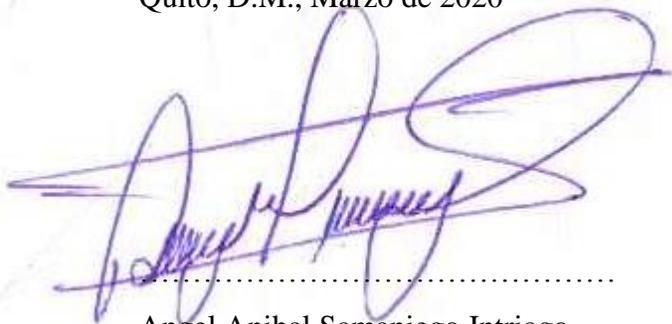
C.C.: 1719006189

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Angel Anibal Samaniego Intriago con documento de identificación N° 1721961538, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “Minimización de los costos de inversión en sistemas de almacenamiento para micro-redes”, 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.

Quito, D.M., Marzo de 2020



Angel Anibal Samaniego Intriago

C.C.: 1721961538

1. ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	4
2. Micro-red.....	5
3. Almacenamiento de energía.....	6
3.1 Energía potencial gravitacional, sistemas de bombeo (PHS).....	7
3.2 Energía cinética, volantes de inercia (FlyW).....	8
3.3 Almacenamiento de energía por aire comprimido CAES.....	8
3.4 Acumuladores (Baterías).....	9
3.5 Almacenamiento Químico.	10
3.6 Sistemas térmicos.....	10
3.7 Sistemas de superconducción (SMES).....	11
3.8 Súpercondensadores (SCESS).	11
4. Implementación del modelo matemático.	12
4.1 Funciónobjetivo.	12
4.2 Costo de inversión.....	13
4.3 Costo de operación y mantenimiento.....	13
4.4 Costo de energía generada por el sistema.	13
4.5 Restricciones del sistema	13
5. Análisis de resultados.....	14
6. Conclusiones.	16
7. Trabajos futuros.	16
8. Referencias.....	16
9. Estado del arte	19
9.1Matriz de Estado del Arte	19
9.2 Resumen de Indicadores	21

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de una micro-red.....	6
Figura 2. Central de bombeo.....	7
Figura 3. Esquema y componentes de un volante de inercia.	8
Figura 4. Almacenamiento de energía mediante aire comprimido CAES.....	9
Figura 5. Almacenamiento de energía eléctrica en base a hidrógeno.	10
Figura 6. Almacenamiento basado en concentradores de calor y sal fundida	11
Figura 7. Almacenamiento basado en superconductores.	11
Figura 8. Estructura de un supercondensador.	12
Figura 9. Aporte de potencias de cada sistema.	15
Figura 10. Costos totales de cada sistema.....	15
Figura 11. Costo nivelado de la energía.....	16
Figura 12. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	22
Figura 13. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	22
Figura 14. Indicador de solución - Estado del arte.	22

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características principales que definen a una batería	10
Tabla 2. Datos característicos para desarrollo del modelo.....	14
Tabla 3. Algoritmo de minimización de costos.	14
Tabla 4. Participación de cada sistema en Kw.....	14
Tabla 5. Evaluación de Costos	15
Tabla 6. Características técnicas de cada tecnología.	23
Tabla 7. Ventajas y desventajas de cada tecnología.	24

4. ÍNDICE ANEXOS

Anexo 1. Comparativa entre Tecnologías de almacenamiento.....	23
Anexo 2. Comparativa sistemas de almacenamiento.....	24

MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PARA MICRO-REDES

Resumen

Desde un punto de vista económico, ambiental, energético y social existe la necesidad de desvincular la generación basada en combustibles fósiles.

La generación distribuida, el almacenamiento de energía a pequeña y mediana escala, la electrónica de potencia y sistemas de comunicación en micro-redes resultan ser una respuesta oportuna a dicha necesidad.

El crecimiento de la curva de la demanda, la limitación de los sistemas eléctricos de potencia más su costosa ampliación, son causas para integrar sistemas de generación y almacenamiento distribuido, debido a esto surge la necesidad de optimizar en función a sus costos de inversión, operación y mantenimiento.

Es el propósito de esta investigación, desarrollar un modelo que permita determinar desde un punto de vista económico, cual tecnología es la más viable, tomando en cuenta restricciones de capacidad de cada una de ellas y demanda del sistema.

Se presentan tres escenarios uno sin limitación de demanda para poder evaluar el aporte nominal de todos los sistemas, el segundo para determinar cuál de las tecnologías es más costosa, y el tercero con cierta restricción de potencia, con el fin de obtener un modelo cercano al concepto de micro-red y evaluar la tecnología más económica.

Palabras Clave: micro-red, tecnologías de almacenamiento, baterías, generación distribuida, distribución, costos de inversión, perfil de voltaje.

Abstract

From an economic, environmental, energy and social point of view, exist the necessity of decoupling the generation based on fossil fuel.

The distributed generation and energy storage to small and medium scale, power electronics and communication systems in micro-networks are the solution to that necessity.

The growth of the demand curve, the limitation of electric power systems plus their expensive expansion, are causes to integrate distributed and generation storage systems, so that, it produced the necessity to optimize in function of their costs about investment, operation and maintenance.

It is the purpose of this investigation, from an economic point of view, to develop a model that allows to solving which technology is the most economic, taking into account the capacity, constraints of each one and demand of the system.

Three events are evaluated: one without demand limitations to be able to get the nominal contribution of all systems, the second to know which of the technology is more expensive, and the last with a low power restriction, aiming to get a model close to micro-red concept and evaluate the most economical technology.

Keywords: micro-red, storage technologies, batteries, distributed generation, distribution, investment costs, voltage profile.

1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia son instalaciones que tienen como objetivo suministrar energía eléctrica de forma oportuna, cumpliendo estándares de calidad y al menor costo.[1]

La cantidad de energía que una sociedad consume está directamente ligada al nivel socioeconómico de la misma, el usuario final requiere tener un nivel adecuado de tensión y frecuencia en sus terminales, con base a esto, los sistemas de generación, transmisión y distribución deben estar eficientemente ligados.

Una solución ante los requerimientos mencionados es la adición al modelo clásico de generación transmisión y distribución; el concepto de almacenamiento energía y micro-redes, mismos que pueden representar una alternativa eficiente al consumo energético. [2]

En [3] el almacenamiento y la producción de energía a través de sistemas de generación distribuida son conceptos que están vinculados, el aumento de la generación mediante recursos renovables convencionales y no convencionales, la existencia de picos de demanda cada vez más altos y la paulatina creciente de sistemas inteligentes conlleva al impulso de un sistema de almacenamiento de energía sustentable y eficiente.

Acorde al análisis en [4], una micro red es parte del sistema de distribución que comprende generación almacenamiento y transmisión, puede trabajar de forma aislada o conectada a la red.

Los sistemas de almacenamiento como centrales de bombeo y almacenamiento por compresión de aire (CAES) son analizados de forma general en [5] y [6], reflejando la gran capacidad de estas tecnologías su alto grado de madurez y flexibilidad para que otras se adapten.

Respecto a volantes de inercia en [7] y [8] se analiza de forma descriptiva y detallada datos técnicos, así como su funcionamiento alta densidad de potencia y baja de energía; características como la velocidad de respuesta ante cambios de carga, procesos de construcción, tipos de volantes, las eficiencias de los volantes de inercia en relación a los materiales y tamaños.[9]

Tiempo de carga y descarga, eficiencias, ciclabilidad son propiedades inherentes de las baterías así como el voltaje la densidad y el tipo de material del que están hechas son características que definen su capacidad [10]

El almacenamiento de energía mediante fuerzas electrostáticas por medio de capas separadas por un electrolito que es el material que lo diferencia de un condensador normal son conceptos revisados en [11].

El funcionamiento de los concentradores de calor consiste en transformar la energía térmica comúnmente con motores de calor a eléctrica, existen acumuladores basados en sal fundida que resultan ser costosos y requieren de tamaños considerables para su ejecución, esta tecnología refiere a los sistemas de almacenamiento térmicos.[12]. Tipos de superconductores funcionamiento componentes y condiciones de superconducción son revisados en [13].

En [14] se define celdas de hidrógeno proceso de electrólisis y la química asociada a esta tecnología; componentes básicos, limitaciones existentes respecto almacenamiento, topologías en [15].

La evaluación económica contempla la adición de un nuevo modelo de gestión, la inserción de sistemas de almacenamiento y redes inteligentes como un sistema integral que complemente el modelo clásico del sistema eléctrico de potencia. [16], [17].

El desarrollo del modelo matemático se lo realiza con un optimizador para lo cual existen ciertos criterios de funcionamiento

y programación inherentes del entorno GAMS[18], [19].

El modelo está basado en programación lineal relacionando directamente los costos de inversión operación mantenimiento y un factor de actualización en función de la vida útil de cada sistema.[20].

De manera general los costos de inversión están asociados a los costos específicos tanto de energía como de potencia, el tiempo de vida útil y una tasa de actualización del valor fijo, los costos de mantenimiento representan una fracción del costo de inversión y son propios de cada tecnología. [5]

El objetivo de esta investigación, es el desarrollo del modelo matemático, adicional una revisión bibliográfica de cada tecnología así poder tabular ciertos resultados para su debida comparación tanto económica como técnica.

Son varios los factores que determinaran cual sistema es menos costoso, los principales a tomar en cuenta: el factor energético o rendimiento del sistema, la vida útil, ciclos de carga y descarga, capacidad de almacenamiento y costos específicos. [21].

La sección 1 plantea la introducción global del artículo, sección 2 marco teórico en micro redes y generación distribuida, finalizando con la teoría la sección 3 detalla principios de operación de cada tecnología de almacenamiento, resultado de lo anterior la sección 4 desarrolla el objetivo de la investigación, el modelo matemático, análisis de resultados en la sección 5, finalmente conclusiones, trabajos futuros y matriz del estado del arte en secciones 6-7 y 8 respectivamente.

2. Micro-red

Es una parte del sistema de distribución que comprende generación, almacenamiento transmisión y carga (ver figura 1), puede trabajar de forma aislada o conectada a la

red, cuenta con un sistema de comunicación que puede interactuar con la red eléctrica, favorece la generación mediante recursos renovables no convencionales principalmente energía solar y eólica.[22]

Es imperativo contar con sistemas de almacenamiento eficientes, un sistema de control de flujo de potencia, monitoreo y mantenimiento. [23]

Es así como las tecnologías de supervisión, control, almacenamiento de energía, generación transmisión y distribución deberán ser integradas para formar una micro-red.[3]

Debido a la intermitencia de generación y la capacidad de almacenamiento, la micro-red es conectada a nivel de distribución y su capacidad depende normalmente del sistema de conversión [4].

Al estar conectadas junto a la carga se evitan pérdidas por transmisión, se obtiene una mejora en la calidad del voltaje y regulación de frecuencia, a nivel ambiental se reducen descargas por emisiones gaseosas en generadores basados en combustibles fósiles.[24]

2.1 Generación distribuida.

La generación distribuida es una parte de la micro-red [23] que entrega energía en pequeñas cantidades situadas cercanas al consumidor convirtiéndole a este en un elemento consumidor y productor, lo que representa ciertos derechos y obligaciones, mismas que requieren de un marco legal al nuevo actor denominado prosumidor [25].

Ciertas características adicionales:

Este sistema comúnmente no es promovido por el ente regulador de cada país, su conexión es a nivel de baja y media tensión algunas bibliografías indican hasta 145 kV y 50 MW de potencia [2].

Bajas perdidas por transmisión, existe mayor confiabilidad al poder ser independientes de la red pública y contar con su propio sistema de generación

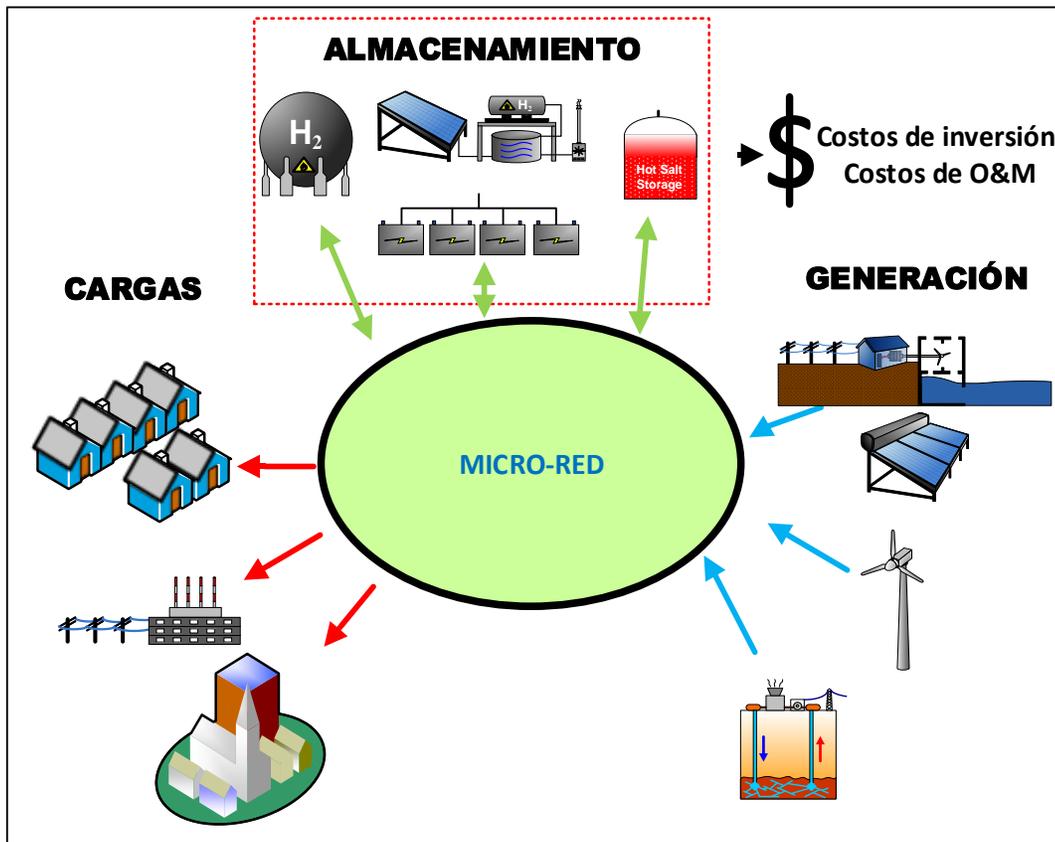


Figura 1. Estructura de una micro-red

Al tratarse de una tecnología en proceso de desarrollo resulta ser costosa de implementar entre otros factores por el mismo sistema de almacenamiento comunicación y conversión de potencia.

Partiendo de esto se requiere de una exhaustiva investigación adicional a sistemas de almacenamiento, focalizada en sistemas de control, gestión de red, y medición inteligente en tiempo real.[26]

3. Almacenamiento de energía.

Existe una barrera en la cual el consumo de energía debe estar alineado o en tiempo real a la generación de energía, resulta necesario desarrollar tecnologías de almacenamiento eficientes y de bajo costo para poder traspasar esta barrera.

La evolución de las redes eléctricas tanto en la producción como en el consumo requieren de un nuevo giro de gestión, el sistema tradicionalmente constituido por generación transmisión subtransmisión y distribución debería considerar la adición de un nuevo modelo, el almacenamiento de

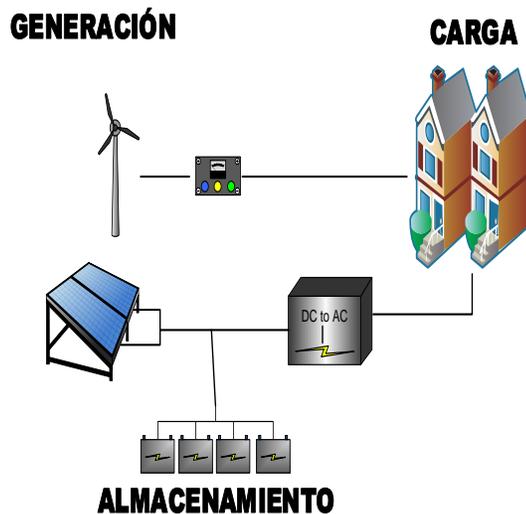


Figura 2. Modelo de generación distribuida.

energía a partir de la generación distribuida.

Este nuevo modelo brinda la oportunidad de almacenar la energía cuando el costo sea bajo y así poder emplearla en horas donde la demanda supera a la generación, las ventajas principalmente son una disminución de costos marginales al no despachar unidades térmicas costosas y poco eficientes, mayor eficiencia de los sistemas al poder operar en condiciones nominales, mayor confiabilidad y robustez al contar con energía de respaldo, una mejor o más fácil gestión de la energía, un aumento en la vida útil de la planta al no tener grandes perturbaciones, mejoramiento en la calidad de la energía estabilizando niveles tanto de voltaje como de frecuencia.[5]

Existen diferentes métodos de transformación de energía unos más eficientes, otros más económicos todos varían de alguna forma y dependen de varios factores entre ellos ambientales y técnicos para poder cuantificar sus eficiencias, sus aplicaciones ventajas y desventajas.

Toda la energía extraída de la naturaleza no se puede convertir en electricidad, las pérdidas normalmente se transforman en calor, existen métodos combinatorios que pueden aprovechar tales pérdidas y así elevar la eficiencia del sistema minimizando las pérdidas de energía.

Adicional a esto se debe considerar las pérdidas por autodescarga en estado estacionario del sistema, la vida media que permita su uso dentro de los límites permitidos de operación.

En consecuencia y como indica la introducción de este artículo, existen diferentes tipos de sistemas de almacenamiento de energía que se analizarán a detalle.

3.1 Energía potencial gravitacional, sistemas de bombeo (PHS).

Es la forma más eficiente de mantener la energía a gran escala, los embalses son empleados generalmente en centrales hidroeléctricas, su única pérdida por nombrarla así es la evaporación del agua, una desventaja del sistema de transformación es la doble conversión, de energía de cinética a mecánica, y finalmente a eléctrica dependiendo de eficiencias de cada elemento, turbina y generador.

Entre otras características:

La capacidad de almacenamiento está limitada a la magnitud del embalse

Baja velocidad de respuesta ante cambios bruscos de carga lo que afecta directamente al nivel de voltaje y frecuencia.

Requiere de grandes asentamientos para su infraestructura su construcción es de largos periodos de tiempo, contrario a su operación que es menos compleja y no requiere de tanto personal.

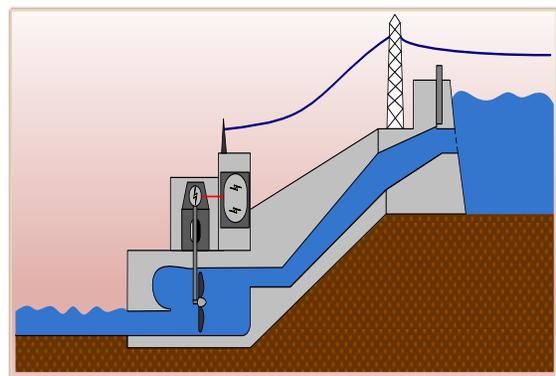


Figura 2. Central de bombeo

Es quizá el sistema más eficiente existente y el más empleado en países de América del Sur, su puesta en marcha e inversión inicial de operación suele llegar a ser muy costosa debido a su gran infraestructura, la misma que va desde el embalse hasta la devolución del agua a su cauce normal en las condiciones más estables y menos agresivas hacia el medio ambiente, los costos de operación son relativamente

bajos sobre todo porque su materia prima en este caso el agua se encuentra libre de ser usada.[5]

Los embalses son empleados en sistemas de generación hidroeléctrica, en algunos países representa la tecnología principal de generación, al existir una demanda variable diaria existen costos marginales variables, es por ello que lo ideal es almacenar la energía cuando esta sea barata, y entregarla en las horas de alta demanda cuando su costo aumenta.

3.2 Energía cinética, volantes de inercia (FlyW).

La principal característica de este sistema es la de absorber y ceder energía en un tiempo muy corto, una desventaja es la pérdida ocasionada por la fricción en los cojinetes aunque se ha visto minimizada por el uso de cojinetes magnéticos.[9]

Básicamente la energía se almacena en forma cinética a través de un disco que es acelerado a partir del giro de un motor, para recuperar la energía el motor conmuta a generador aplicando una fuerza en sentido contrario de tal forma que la energía cinética se convierta en eléctrica.

El rotor de inercia es el componente más importante, y se considera:

Diferentes tamaños y composiciones relacionados con su potencia.

La fricción de este elemento se debe mantener al mínimo para prolongar el tiempo de almacenamiento, esto se logra colocando la rueda volante en el vacío y usando cojinetes magnéticos.[8]

En relación a su velocidad de rotación, existe el metálico convencional que gira hasta 5000 rpm empleados para almacenar energía en periodos cortos y medios, y el composite metálico de alta velocidad 10000 hasta 50000, este rotor ofrece potencias entre 100 y 250 kW. [5].

La resistencia del rotor es proporcional a la velocidad de trabajo; aleaciones de acero que puedan resistir grandes fuerzas

centrifugas, de momento se investigan el uso de nanotubos para la fabricación de la rueda.

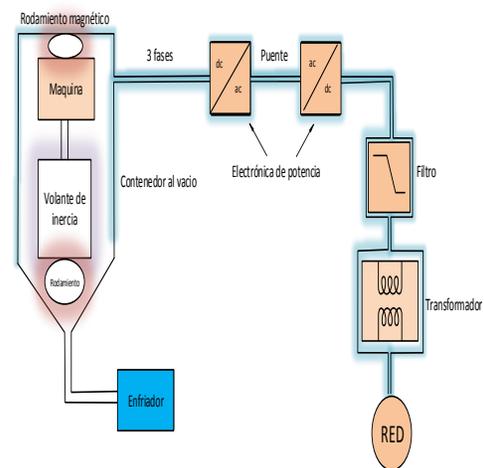


Figura 3. Esquema y componentes de un volante de inercia.

Su rápida respuesta ante variaciones de carga garantiza una regulación de la frecuencia estabilizando niveles de voltaje del sistema, los volantes de inercia responden de forma inmediata ante estas fluctuaciones y con una densidad alta de potencia, estos son sus mejores atributos, ceder y absorber carga de forma inmediata.[27]

3.3 Sistema de almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES).

Se basa en el accionamiento de compresores de aire cuando la energía eléctrica es de bajo costo.

El aire comprimido se enfría y se almacena en cavernas o pozos de gran magnitud bajo tierra, cuando existen momentos de alta demanda este aire es calentado expandiéndose hacia turbinas que transformaran el movimiento de rotación a energía eléctrica.

Existen procesos diabáticos, adiabáticos e isotérmicos con eficiencias del 55% 70% y 75% respectivamente, esto depende de si la

temperatura del aire es aprovechada como otra forma de energía o solo es disipada.[5]

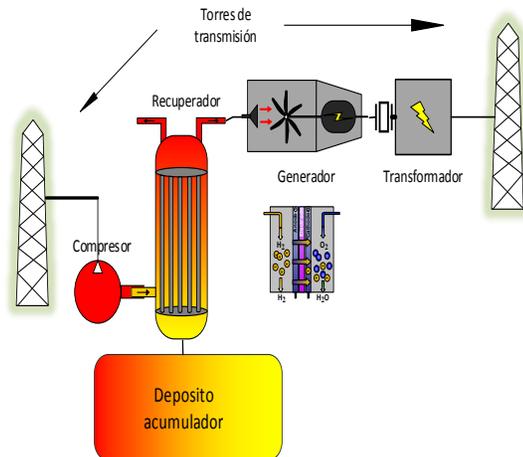


Figura 4. Almacenamiento de energía mediante aire comprimido CAES.

Existe una variante adicional denominada caes submarino, la energía excedente que proviene comúnmente de generación eólica es entregada a compresores que almacenan el aire en tanques que se encuentran bajo ríos mares o lagos, su principal ventaja respecto al caes tradicional es que no tiene la limitación geológica del almacenamiento bajo cavernas y presenta un diseño modular fácilmente escalable, se pretende eficiencias por encima del 70% [5].

De manera general la principal aplicación de este sistema puede ser en mediana y gran escala, para equilibrar la curva entre oferta y demanda, así como para el restablecimiento de la energía, aun es una tecnología en proceso de investigación económicamente no viable, en dependencia de su capacidad de generación esta puede ir desde 550 a 1600 \$/kW.

3.4 Acumuladores. (Baterías)

Las baterías son dispositivos portátiles que están compuestos de elementos que permiten la transformación de energía electroquímica a energía eléctrica mediante reacciones de reducción y oxidación.

La capacidad de una batería viene determinada por su tensión de trabajo

ligada a su diferencia de potencial, y a su densidad de corriente que depende de los componentes químicos que actúan en la oxidación y reducción.[10]

Quizá este sea el modelo de almacenamiento de energía con mayores expectativas en cuanto a lo que se refiere a sistemas de redes menos centralizados como sistemas de generación distribuida en micro-redes. La inserción de automóviles eléctricos al mercado ha contribuido para que esta tecnología de almacenamiento vaya progresando y se esperan menores costos de inversión a mediano plazo.

Una ventaja adicional de este sistema es la rápida respuesta ante variaciones de carga permitiendo entregar una energía con altos estándares de calidad en frecuencia y voltaje.

Algunas de las características específicas de diferentes tipos de baterías:

1. Plomo ácido, de fácil instalación, bajo mantenimiento y bajo costo de inversión, la principal limitante es el tiempo de vida útil y los ciclos de descarga, en una descarga total la batería queda severamente averiada sobre todo en los electrodos.
2. Níquel cadmio, níquel zinc, es la única que se emplea para sistemas de almacenamiento industrial como UPS, a pesar de grandes y superiores diferencias de orden técnico respecto a la de plomo ácido la principal desventaja de esta batería es el alto costo de inversión pudiendo llegar a 10 veces más que la de plomo ácido.
3. Ion-litio, litio polímero, aún no ha sido empleado para almacenar energía en UPS, es la principal tecnología en sistemas móviles y vehículos híbridos. Requiere de poco mantenimiento, la vida útil depende de la temperatura, es un sistema frágil por lo que requiere de un sistema de protección fiable que evite caídas de tensión considerables.

La tabla 1 muestra las principales características que definen a una batería.

Tabla 1. Características principales que definen a una batería

Tecnología	Rango de voltaje de celda [V]	Densidad de energía Wh/Kg	Densidad de potencia W/Kg	Eficiencia %	Ratio de auto descarga	Ciclos de descarga	Vida útil años
Pb-Ac	2	30	180	85 - 90	2%	<1800	<5
Ni-Cd	1,2	50 - 80	>180	65 - 70	10%	>2000	>15
Ni-Zn	1,6	60	>180	80	10%	>2000	>15
Ion-Litio	3,7	80 -150	<2000	90-99	5%	1500	<5
Li-polímero	3.7	100-150	50-250	90-99	5%	1500	<5

3.5 Almacenamiento Químico.

El almacenamiento químico es un proceso que transforma la energía eléctrica en moléculas químicas por medio de electrólisis, consiste: la energía eléctrica excedente circula por un electrolizador que se encarga de dissociar las partículas del agua, liberando el oxígeno hacia la atmosfera y almacenando el hidrógeno a altas presiones para poder trasladarlo, este a su vez por el alto grado de inflamación será combustionado en motores similares a los del gas natural pero adaptados a hidrógeno.

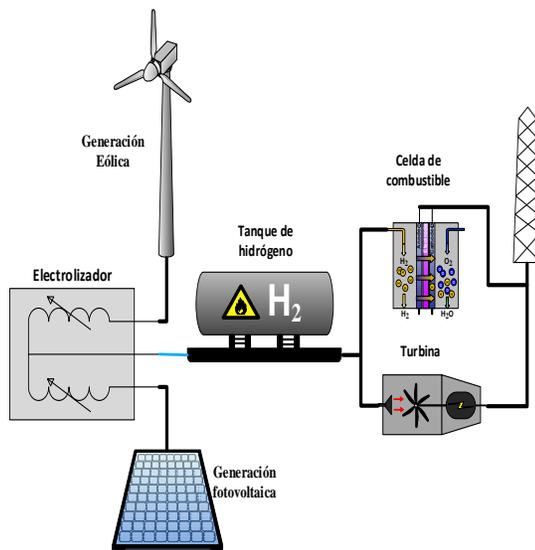


Figura 5. Almacenamiento de energía eléctrica en base a hidrógeno.

Este sistema es oportuno emplearlo donde existen sistemas de generación que por la

naturaleza de su fuente son volátiles, renovables no convencionales eólica y solar principalmente, es por ello que cualquier excedente de energía se lo podría transformar en energía química y almacenarla en partículas de hidrógeno.[14]

Se aplica corriente continua mediante dos electrodos (ánodo y cátodo), el electrolito determina el tipo de electrolizador y es ácido (sólido) o alcalino (líquido), este se encarga de transportar los iones entre electrodos, para limitar el paso de compuestos se emplea una membrana o diafragma dependiendo el tipo de electrolizador.

Quizá la mayor limitante es la capacidad de almacenamiento, debido a la intolerancia de los materiales al hidrógeno bajo presión, la presurización del hidrógeno, la absorción en hidruros metálicos la licuefacción y la absorción mediante nanotubos, está en investigación aun, son las tecnologías que se emplean para poder trasladarlo.[15]

3.6 Sistemas térmicos.

El objetivo de esta tecnología es aprovechar cualquier residual de energía térmica producida, se basa principalmente en energía solar de concentración térmica, y existen ciertas zonas específicas a nivel mundial donde es conveniente desarrollar este sistema.

Emplea colectores o concentradores de calor, son elementos ópticos en forma de espejos, que trasladan esta temperatura hacia un reservorio (ver figura 17), como puede ser sal fundida, de esta forma alimentar turbinas de vapor o aire caliente para producir electricidad.[12]

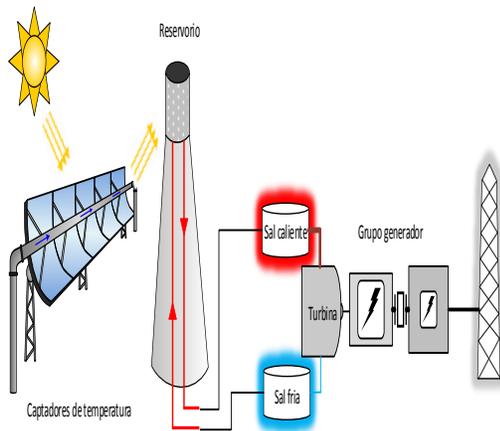


Figura 6. Almacenamiento basado en concentradores de calor y sal fundida

Existen tres formas diferentes de almacenar energía, calor sensible, es el más común se basa en el cambio de temperatura del medio de almacenamiento, la mayoría de sistemas emplean esta tecnología, calor latente, se basa en el cambio de fase del elemento que almacena la energía, trabaja dentro de un rango de temperaturas limitadas al campo solar, finalmente el almacenamiento químico, presenta un mayor potencial que los anteriores pero existe limitación en la transferencia de calor relacionadas con la inestabilidad cíclica y elevados costos para su implementación. [28]

3.7 Sistemas de superconducción (SMES).

Una restricción en la mayoría de los sistemas de almacenamiento es la velocidad de respuesta para trasladar su energía, debido a las pérdidas producidas por la resistencia propia del material de conducción, para ello la solución es encontrar un material que presente una resistencia nula, existen materiales

superconductores que a ciertas temperaturas por debajo de los -268.95°C [29] (temperatura crítica de superconductividad), cumplen con el concepto de resistencia cero.

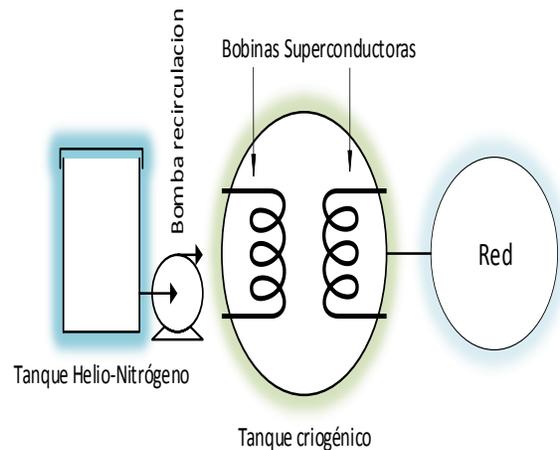


Figura 7. Almacenamiento basado en superconductores.

Una limitante de este proceso es el costo del sistema criogénico, en compensación a este cabe recalcar que se obtienen eficiencias por encima del 95%. [5]

El sistema consiste en el almacenamiento de la energía en forma de campo magnético debido a la circulación de electrones a través de una bobina superconductora que se encuentra por debajo de la temperatura crítica de superconducción.

3.8 Súper condensadores (SCES).

Su principio de funcionamiento es el mismo que el de un condensador normal, almacena energía eléctrica entre el electrodo y el electrolito debido a la diferencia de potencial aplicado en el capacitor. [11]

Su construcción varía ya que en lugar de emplear un dieléctrico entre capas se emplea un electrolito entre las mismas; existen tres tipos de supercondensadores:

1. Condensadores de doble capa (EDLC).
2. Pseudocapacidades.
3. Sistemas híbridos que combinan procesos de corriente faradaica y no faradaica para almacenar carga.

Los supercondensadores tienen mayores capacidades del orden de los miles de faradios, su almacenamiento guarda directa proporcionalidad con la superficie del electrodo que puede llegar a aumentar gracias a nano poros que se forman utilizando carbón activado.

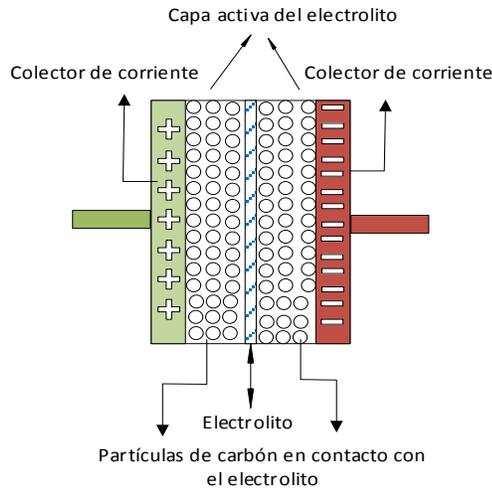


Figura 8. Estructura de un supercondensador.

El mayor interés en emplearlo es su capacidad de entregar una gran cantidad de energía en un periodo de tiempo inmediato (mínima resistencia al paso de corriente), por lo que es ideal combinarlo con otros sistemas que sean capaces de mantener un periodo más largo de almacenamiento. Características adicionales son la larga vida cíclica, alta capacidad de energía, y sus materiales de construcción no son perjudiciales para el medio ambiente. [5] Tomado en cuenta estas características este tipo de almacenamiento ayuda a cumplir con requerimientos de calidad en relación a voltaje y frecuencia a causa de cambios de carga, es una tecnología en proceso de evolución y es bien empleada como en combinación de otras tecnologías de almacenamiento.

4. Implementación del modelo matemático.

La necesidad de realizar un modelo que determine qué tipo de tecnología de almacenamiento es más económica para micro-redes será necesaria si resulta de menor costo que generarla de forma convencional, partiendo de aquellos que existen sistemas de almacenamiento que han madurado a lo largo de los años entre ellos: sistemas de bombeo en hidráulicas y baterías de plomo ácido, las demás como los supercapacitores volantes de inercia baterías de litio etc., son relativamente jóvenes por lo que sus costos aún son elevados.[16]

Debido a ello es necesario realizar una evaluación económica con el objetivo de determinar si es favorable la generación de un kWh con sistemas de almacenamiento o puesto en la red eléctrica de manera convencional.

4.1 Función objetivo.

Para determinar la viabilidad de adoptar alguna de las alternativas del presente documento se analiza los diferentes costos que implica cada tecnología en relación a su inversión, operación, mantenimiento y tiempo de vida.

El modelo propuesto consiste en la minimización de costos de inversión en sistemas de almacenamiento para micro-redes, su forma de modelación con programación lineal será:

$$FO.. \text{ Min } Z = \sum_{j=1}^k C_j X_j \quad (1)$$

Donde:

Z: Función objetivo a minimizar;

C: constante de costos de cada tecnología;

X: variable de potencia de cada tecnología. [30]

Partiendo de esta ecuación:

$$C_{tot} = (C_{inv} + C_{O\&M}) * (1+i)^n \quad (2)$$

Donde C_{tot} es el costo total, C_{inv} es el costo de inversión del sistema, $C_{O\&M}$ son los costos de operación y mantenimiento, $(1+i)^n$ es un factor asociado al costo financiero futuro del sistema, en el que i representa una tasa anual de actualización y n el tiempo de vida en el que se espera recuperar la inversión del sistema.

4.2 Costo de inversión.

Costo relacionado a la capacidad de nuestro sistema, depende de la capacidad de energía de potencia de nuestro sistema, normalmente se lo relaciona con la infraestructura equipamiento costos de conversión de potencia, etc...

$$C_{inv} = c_e * E + c_p * P \quad (3)$$

Donde c_e es el costo específico por unidad de energía y c_p el relacionado a potencia.

4.3 Costo de operación y mantenimiento.

Depende de varios factores por ejemplo ambientales, de operación, ciclabilidad en caso de baterías, por lo que su grado de incertidumbre es muy alto, normalmente se lo toma como un porcentaje del costo de inversión.

$$C_{O\&M} = k * C_{inv} \quad (4)$$

Donde k es la proporción a considerar en base a los costos de inversión.

4.4 Costo de energía generada por el sistema.

Como dato adicional se llegará a obtener el valor del costo nivelado de energía, LCOE el cual viene dado por:

$$LCOE = \frac{C_{tot}}{E * 8760 * \eta} \quad (5)$$

El costo nivelado de energía, viene determinado por el la relación entre el costo

total del sistema y la energía nominal E por el número de horas del año y la eficiencia característica de cada sistema.

4.5 Restricciones del sistema

Están relacionadas directamente a la capacidad teórica de cada tecnología.

$$Pot_{(i)} \leq Pot_{max(j)} \quad (6)$$

4.6 Aplicación del modelo

Para el desarrollo del problema se empleó el sistema general de modelado algebraico GAMS, se ha considerado las tecnologías más favorables para micro-redes.

Se plantearon tres escenarios de demanda:

1. Todas las tecnologías evaluadas participan en el abastecimiento a la red.
2. Potencia que determine que sistemas dejan de abastecer por el hecho de ser menos favorables económicamente.
3. Con restricción menor que asemeje al consumo de una micro red, en este escenario se determina cual de tecnologías económicamente hablando es la más viable.

Escenarios:	Potencia
1	705000 Kw
2	186500 Kw
3	59500 Kw

Sistemas de almacenamiento

PHS:	Hidráulico de bombeo.
HESS:	Hidrógeno
CAES:	Aire comprimido.
VRB:	Flujo redox vanadio.
ZBR:	Flujo zinc-bromuro.
NaS:	Sodio-Azufre.
Pb-Ac	Plomo-ácido
Li-ion	Ion Litio
SMES	Superconductor
FlyW	Volante de inercia
SCESS	Supercapacitor.

Tabla 2. Datos característicos para desarrollo del modelo.

	PHS	HESS	CAES	VRB	ZBR	NaS	Pb-Ac	Li-ion	SMES	FlyW	SCESS
ce	65.9	10,5	32.4	518.8	548.2	434.2	199.9	991.7	7617.5	1699.4	9278.7
cp	1380.7	1067.5	1310.2	1656.	904.8	989.1	735.1	2605.2	625.4	795.1	275
i (pu)	0.02	0.02	0.02	0,02	0,02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
n años	45	12.5	35	15,83	8.2	14.2	9.5	13.33	20	20	12.5
k(pu)	0.0038	0.01	0.0065	0,01	0.01	0.0075	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
η	0.72	0.38	0.71	0.77	0.74	0.83	0.76	0.86	0.88	0.88	0.78
h(h)	5	8	4	8	4	7.2	4	1	0	0,25	0.04
DoD	0.95	0.9	0.63	1	0.95	0.7	0.7	0.7	0.9	0.5	0.5

Donde:

ce: costo específico por unidad de energía [\$/kWh].

cp: costo específico por unidad de potencia [\$/kW].

i: tasa de financiación anual [pu], actualiza el costo de capital a unidades monetarias por año.

n: año de funcionamiento del sistema. [Años]

k: porcentaje de mantenimiento respecto al costo de inversión [pu].

η : rendimiento [pu].

Tabla 3. Algoritmo de minimización de costos.

Algoritmo de minimización de costos	
Paso 1:	Inicio
Paso 2:	Variable en función de cada sistema /SA1*SA12/ Características específicas. Cinv; Co&m; Tasa de financiación anual Escenarios, /P1,P2,P3/
Paso 3:	Datos específicos. Dod, i, n, Ce, Cp, etc ...
Paso 4.	Restricción de potencia máxima y mínima Restricción de valores positivos. Restricción de potencia requerida.
Paso 5.	Función objetivo
Paso 6.	Minimización de función objetivo. MinLp (programación de minimización lineal)
Paso 7.	Visualización y resultados.

5. Análisis de resultados.

La tabla 4 indica la potencia de participación de cada uno de los sistemas acorde a los escenarios planteados.

Tabla 4. Participación de cada sistema en Kw.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
PHS	500000	0	0
HESS	50000	50000	0
CAES	70000	69500	0
VRB	7000	0	0
ZBB	7000	7000	0
NaS	50000	50000	49500
Pb-Ac	10000	10000	10000
Li-ion	9000	0	0
SMES	800	0	0
FlyW	700	0	0
SCESS	500	0	0
Potencia total	705000	186500	59500

El objetivo de minimizar los costos de almacenamiento es encontrar la tecnología más acorde para aplicaciones en micro-redes, adicional es importante contar con el costo nivelado de energía, así poder comparar el costo que representa generar energía en sistemas tradicionales, en función a almacenar en sistemas alternativos.

Si bien existen sistemas como los SMES, volantes de inercia y supercapacitores que les favorece una gran capacidad de respuesta ante cualquier evento, no son

tecnologías afines a micro-redes, debido a que se requiere de un suministro de energía durante largos periodos de tiempo, característica que es conseguida con baterías redox, de flujo, ion-litio, plomo ácido, hidrógeno.

Con base a lo anterior, la figura 9 y tabla 4 muestran que las tecnologías de almacenamiento basadas en baterías de plomo ácido y sodio azufre (NaS) son las más favorables para la aplicación.

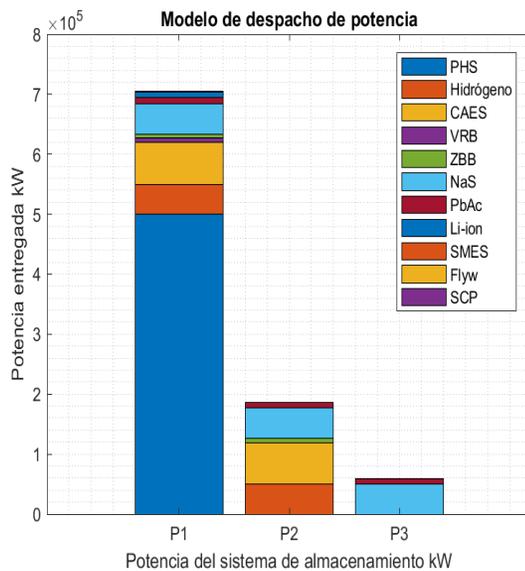


Figura 9. Aporte de potencias de cada sistema.

La tabla 5 indica las potencias de aporte total de cada sistema, realizando un análisis de potencia entregada de los principales sistemas que participan se obtuvo:

1. Las centrales de bombeo aportan con un total del 70.9% de la demanda mientras que las baterías plomo ácido únicamente el 1.4%, escenario
2. Las centrales de bombeo dejan de suministrar potencia debido a sus costos totales, mientras que CAES aporta un 18%, baterías sodio azufre el 13% y plomo ácido con el 2.6%, finalmente;
3. CAES deja de aportar, las baterías sodio azufre participan con el 83% mientras que plomo ácido con el 17%.

Al desarrollar un modelo basado en costos de inversión operación y mantenimiento, se desfavorece a tecnologías que requieren una mayor infraestructura tales como: sistemas de bombeo y compresión de aire; y se favorece a tecnologías más pequeñas por ejemplo: baterías que presentan costos de inversión menores como las de plomo ácido y en parte sodio azufre.

Tabla 5. Evaluación de Costos

	C_{inv} (M\$)	$C_{O\&M}$ (M\$)	TOTAL (M\$)	LCOE ¢\$
PHS	295,00	11,23	306,23	0,09
HESS	17,28	0,17	22,35	0,18
CAES	129,62	0,84	260,90	0,09
VRB	0,09	0,00	0,12	0,15
ZBB	3,10	0,03	3,68	0,15
NaS	139,93	1,05	186,94	0,14
Pb-Ac	15,35	0,15	18,71	0,11
Li-ion	179,85	1,80	236,52	0,17
SMES	0,63	0,01	0,95	0,07
FlyW	24,40	0,24	36,62	0,08
SCSS	0,16	0,00	0,21	0,09

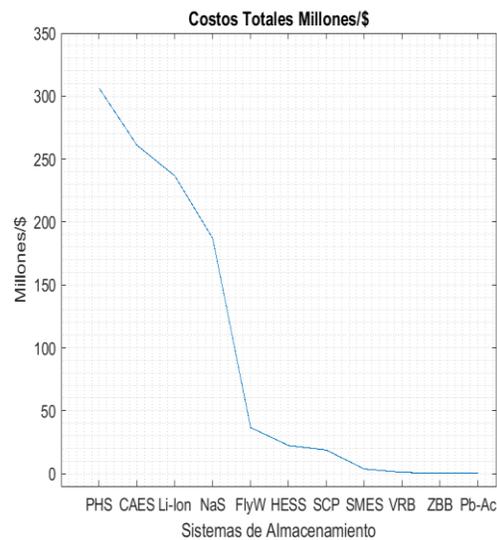


Figura 10. Costos totales de cada sistema

Finalmente, el costo nivelado de energía en instalaciones de bombeo de agua, de aire comprimido y en los de baja densidad de

energía y alta velocidad de respuesta como son: volantes de inercia superconductores y supercondensadores, resulta sensiblemente menor que en baterías de flujo, redox y demás, pero como se indica anteriormente no son tecnologías aptas en almacenamiento de energía para micro-redes.

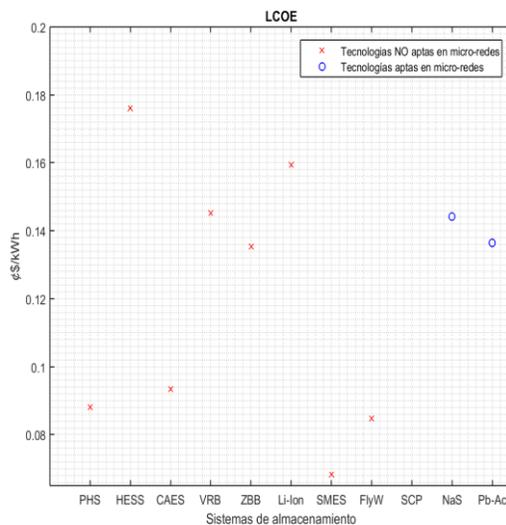


Figura 11. Costo nivelado de la energía.

6. Conclusiones.

En base al modelo realizado se determina que el sistema de almacenamiento más económico en función de los costos de inversión, operación, mantenimiento y vida útil son las baterías plomo ácido que cuentan con una gran madurez dentro del mercado.

Existe una amplia gama de sistemas de almacenamiento de energía, cada cual cuenta con acentuadas diferencias en la mayoría de sus características, debido a esto la comparación basada únicamente en costos no resulta ser la más idónea, se debe tomar en cuenta la densidad de energía, de potencia, la ciclabilidad tiempos de carga y descarga por mencionar algunas, debido aquello el uso en alguna actividad en particular debe considerar estas y más

características, o a su vez sistemas combinados de almacenamiento podrían tener mayores eficiencias y altos índices de confiabilidad y calidad.

Existe una gran cantidad de barreras para la inserción del almacenamiento de energía como una parte del sistema eléctrico de potencia, económicamente hablando hay mucho por investigar; las tecnologías más maduras son de bombeo de agua y baterías de plomo ácido, esto indica que los costos de los demás sistemas tienen grandes oportunidades de minimización, adicional aquello no existe un marco regulatorio que determine la forma de interactuar en este nuevo mercado; la existencia de elementos químicos centralizados en unos pocos países también es sinónimo de preocupación China tiene las mayores fuentes de vanadio para la fabricación de baterías lo que puede monopolizar el mercado, ambientalmente hablando no existe una cultura de reciclaje, su manipulación puede llegar a ser nociva para la salud y el medio ambiente.

7. Trabajos futuros.

En base a la investigación y modelo desarrollado se propone adicionar varias restricciones entre ellas la energía empleada para cargar el sistema, la ciclabilidad, tiempos de carga y descarga, perfiles de voltaje y frecuencia la afectación de un sistema de conversión de potencia, de esta forma poder disminuir el grado de incertidumbre que presenta la evaluación de cada tecnología.

También adicionar índices de confiabilidad y calidad para poder monitorear los beneficios de introducir sistemas de almacenamiento a la micro-red; es decir “costos de implementación de un sistema de almacenamiento para micro-redes considerando índices de confiabilidad.”

8. Referencias.

[1] A. F. Q. RODRÍGUEZ, “Ubicación

- óptima de sistemas de almacenamiento para maximizar la continuidad de servicio en una micro red,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [2] S. P. C. and P. C. S. Chowdhury, *Microgrids and Active Distribution Networks*. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [3] J. P. Fossati, “Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes. Literature review of microgrids,” *Mem. Trab. Difusión Científica y Técnica*, vol. 9, pp. 13–20, 2011.
- [4] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, *Microgrids research : A review of experimental microgrids and test systems*, vol. 15, no. 1. Canada.: Elsevier Ltd, 2011.
- [5] J. R. Morante, *El almacenamiento de electricidad*, Fenosa, Fu. España, 2014.
- [6] Hugh Rudnick, “Almacenamiento de Energía : Desarrollos Tecnológicos y Costos,” Pontificia Universidad Católica de Chile, 2008.
- [7] I. SENER, CONACYT, “National Priorities for Research, Technological Development and Human Resources Training for the Mexican Energy Sector,” México, Nov-2017.
- [8] J. M. Marinier, “Volante de inercia,” 2016.
- [9] L. R. Masferrer, “Análisis Y Diseño De Volantes De Inercia De Materiales Compuestos,” Universitat de Girotat, 2005.
- [10] L. F. O. P. Dalton Rodrigo Ojeda Pereira, “Diseño y construcción de un prototipo de batería recargable para una bicicleta eléctrica tipo trike mediante el uso de baterías recicladas de ion de litio 18650,” Universidad Politécnica Salesiana., 2017.
- [11] Silvia María Roldán Luna, “Supercondensadores basados en electrolitos redox activos,” Universidad de Oviedo, 2013.
- [12] A. G. Ruiz, “Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura.,” *Esc. Técnica Super. Ing. Univ. Sevilla*, 2016.
- [13] G. G. Gonz, “Almacenamiento de energía magnética por superconducción,” *Tecnol. a fondo.*, vol. 4, pp. 29–32, 2013.
- [14] I. T. Solutions, “Almacenar electricidad con tecnologías de hidrógeno,” *Innov. Technol. Solut. Sustain.*, 2016.
- [15] L. V. Isorna, “Gestión de Energía en Sistemas con Fuentes Renovables y Almacenamiento de Energía Basado en Hidrógeno Mediante Control Predictivo,” Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, 2013.
- [16] S. H. VALENZUELA, “Evaluación económica de un sistema de baterías para la optimización de cargos por potencia en el mercado Chileno,” Tesis de ingeniería: Universidad de Chile, Departamento de ingeniería industrial., 2017.
- [17] A. S. A. Antonio Gómez Expósito, *El almacenamiento de energía en la distribución eléctrica del futuro*, Real acade. Madrid, 2017.
- [18] O. C. O. N. Gams and E. Empresarial, *Cuaderno de prácticas de ordenador con gams*, Issofruí. Santiago, Chile, 2006.
- [19] GAMS, “El entorno GAMS (General Algebraic Modeling System).” Colombia, pp. 273–322, 2005.
- [20] S. M. Schoenung, W. Hassenzahl, and L. Angeles, “Long- vs . Short-Term Energy Storage Technologies Analysis A Life-Cycle Cost Study A

- Study for the DOE Energy Storage Systems Program,” *ResearchGate*, 2016.
- [21] G. J. Martín Chicharro, “Sistemas De Almacenamiento De Energía,” *Esc. Ing. Ind. Univ. Valladolid*, pp. 1–133, 2016.
- [22] R. D. Medina, “Microrredes basadas en Electrónica de Potencia.,” *INGENIUS*, pp. 15–23, 2014.
- [23] F. J. Ramón Ducoy, “Implantación De Energías Renovables En Una Planta De Producción De Amoníaco,” *Univ. Sevilla*, pp. 24–44, 2013.
- [24] 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. Tecnológica.*, vol. 25, pp. 175–188, 2014.
- [25] J. Dominguez, “Energías renovables y generación distribuida.,” *ResearchGate*, no. September, 2018.
- [26] M. B. Payan, “Almacenamiento de energía en distribución eléctrica,” Trabajo de Fin de Master Sistemas de Energía Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, 2017.
- [27] Á. J. S. Canales, “Control de un sistema de almacenamiento de energía empleando volantes de inercia en regulación de frecuencia,” Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2012.
- [28] M. Lidia, M. Gonz, F. Javier, and P. Lucena, “Sistema de almacenamiento de energía térmica basado en vapor en centrales termosolares. Análisis y modelado,” Departamento de Ingeniería eléctrica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla., 2017.
- [29] B. Y, “Modelo Técnico Experimental de Interacción Magnética de elementos superconductivos.,” *Tecnol. a fondo.*, 2010.
- [30] N. S. C. Marisol Valencia Cárdenas, Lisete Niño Rentaría, Andrea Peña Camacho, “Modelo de Optimización para la Minimización de Desperdicios Industriales.,” *Rev. Investig. Apl.*, vol. 8, 2010.

9. Estado del arte

9.1 Matriz de Estado del Arte

MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PARA MICRO-REDES																							
ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Minimización de Costos	Micro-redes	Generación Distribuida	Sistemas de almacenamiento de energía.	Modelamiento en GAMS	Optimización de costos de almacenamiento	Abastecimiento de energía	Capacidad de almacenamiento de energía	Estabilidad de voltaje y regulación de frecuencia	Sistemas de conversión de potencia	Bidireccionalidad de los sistemas	Vida útil de los sistemas de almacenamiento	Eficiencias de cada sistema	Similitud a despacho económico	Simulación iterativa	Implementación de sistemas de almacenamiento	Generación distribuida	Equipos de electrónica de potencia	Madurez de tecnologías	Rediseño de Micro red
1	2009	Ubicación óptima de sistemas de almacenamiento para maximizar la continuidad de servicio en una micro red	15						X					X					X	X		X	
2	2014	Renewable and E. Series, Micro grids and Active Distribution Networks	3		X	X	X		X	X	X		X		X				X	X		X	
3	2011	Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes.	11		X	X	X			X	X			X		X				X			
4	2011	Microgrids research : A review of experimental microgrids and test systems,	56		X	X	X					X		X		X				X	X		
5	2014	El almacenamiento de electricidad.	12	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X
6	2008	Almacenamiento de Energía : Desarrollos Tecnológicos y Costos	7	X		X	X				X	X		X			X	X	X	X	X		
7	2017	Almacenamiento Mecánico (Volantes de Inercia)	113				X									X						X	
8	2016	Volante de inercia	0				X															X	
9	2005	Análisis Y Diseño De Volantes De Inercia De Materiales Compuestos	56				X			X						X						X	
10	2017	Diseño y construcción de un prototipo de batería recargable para una bicicleta eléctrica tipo trike mediante el uso de baterías recicladas de ion de litio	35				X												X				
11	2016	Supercondensadores basados en electrolitos redox activos	4				X			X						X							

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Minimización de Costos	Micro-redes	Generación Distribuida	Sistemas de almacenamiento de energía.	Modelamiento en GAMS	Optimización de costos de almacenamiento	Abastecimiento de energía	Capacidad de almacenamiento de energía	Estabilidad de voltaje y regulación de frecuencia	Sistemas de conversión de potencia	Bidireccionalidad de los sistemas	Vida útil de los sistemas de almacenamiento	Eficiencias de cada sistema	Similitud a despacho económico	Simulación iterativa	Implementación de sistemas de almacenamiento	Generación distribuida	Equipos de electrónica de potencia	Madurez de tecnologías	Rediseño de Micro red
12	2016	Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura	23			X	X										X	X					
13	2013	Almacenamiento de energía magnética por superconducción	31				X								X								X
14	2016	Almacenar electricidad con tecnologías de hidrógeno	17				X								X								
15	2013	Gestión de Energía en Sistemas con Fuentes Renovables y Almacenamiento de Energía Basado en Hidrógeno Mediante Control Predictivo	4				X						X		X			X	X				
16	2017	Optimización de costos por potencia en el mercado industrial	1	X				X			X	X				X							
17	2014	El almacenamiento de energía en la distribución eléctrica del futuro	16	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X			X	X	X			
18	2006	Cuaderno de prácticas de ordenador con GAMS	15	X				X	X							X	X						
19	2006	El entorno GAMS	0	X				X	X							X	X						
20	2016	Long- vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis A Life-Cycle Cost Study	96	X				X	X		X			X			X					X	X
21	2016	Sistemas De Almacenamiento De Energía	177	X	X	X	X		X	X	X	X						X	X				
22	2014	Micro-redes basadas en Electrónica de Potencia : Características , Operación y Estabilidad	81	X	X						X	X			X					X			X
23	2013	Implantación De Energías Renovables En Una Planta De Producción De Amoníaco	25	X	X	X	X	X										X					
24	2014	Review of Characteristics of Energy Storage Systems for Micro-grid Applications	12	X	X	X	X		X					X	X			X		X			X
25	2012	Energías renovables y generación distribuida.	8		X	X	X						X	X				X	X				

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Minimización de Costos	Micro-redes	Generación Distribuida	Sistemas de almacenamiento de energía.	Modelamiento en GAMS	Optimización de costos de almacenamiento	Abastecimiento de energía	Capacidad de almacenamiento de energía	Estabilidad de voltaje y regulación de frecuencia	Sistemas de conversión de potencia	Bidireccionalidad de los sistemas	Vida útil de los sistemas de almacenamiento	Eficiencias de cada sistema	Similitud a despacho económico	Simulación iterativa	Implementación de sistemas de almacenamiento	Generación distribuida	Equipos de electrónica de potencia	Madurez de tecnologías	Rediseño de Micro red
26	2018	Control de un sistema de almacenamiento de energía empleando volantes de inercia en regulación de frecuencia	4				X					X					X						X
27	2016	Minimización de desperdicios Industriales	6	X				X	X											X	X		
28	2017	Trabajo de Fin de Master Sistemas de Energía Eléctrica Almacenamiento de energía en distribución eléctrica	32					X	X						X					X			
29	2010	Modelo teórico experimental de interacción magnética de elementos Superconductivos	14						X	X		X						X					X
30	2017	Sistema de almacenamiento de energía térmica basado en vapor en centrales termosolares. Análisis y modelad	25			X				X			X		X				X				X
				12	10	10	20	5	10	5	8	7	8	7	7	11	5	6	12	10	7	8	6

9.2 Resumen de Indicadores

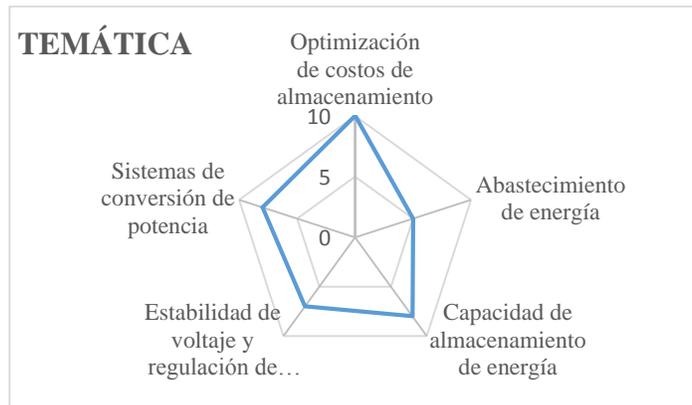


Figura 12. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

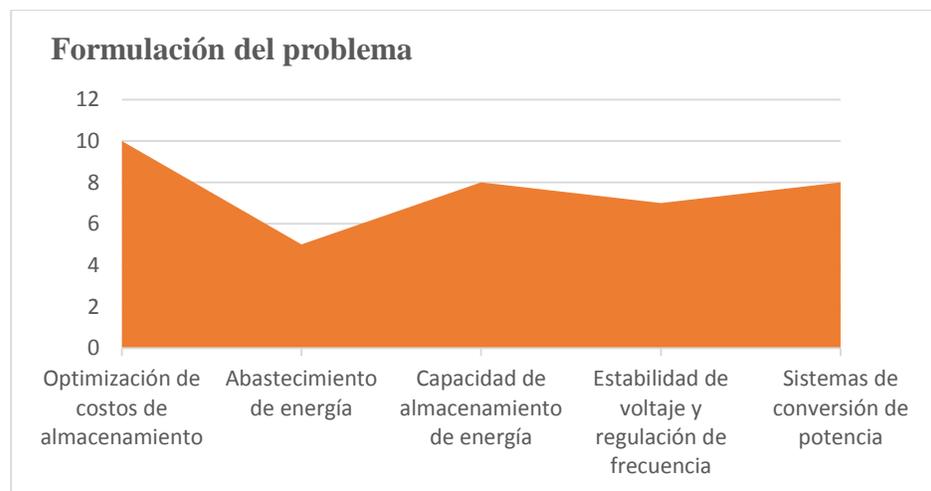


Figura 13. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

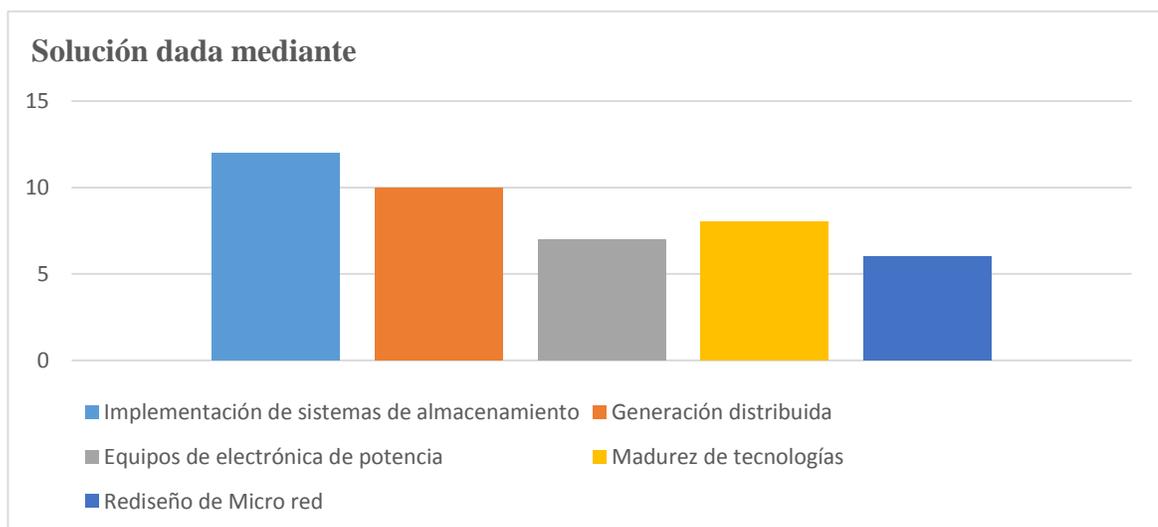


Figura 14. Indicador de solución - Estado del arte.

10. ANEXOS.

Anexo 1. Comparativa entre Tecnologías de almacenamiento.

Tabla 6. Características técnicas de cada tecnología.

	Rango de potencia MW	Duración de Energía.	Tiempo de respuesta	Densidad de energía	Auto descarga	Rendimiento %	Vida media	Costo de instalación \$/kW
Hidráulica	100-5000	1-24 h	seg-min	0,04-1,5 Wh/l	0	75	50-100	385-1650
Volante de Inercia	0.002-20	seg-15 min	seg	5-130 Wh/kg	0-100	85-95	>20	1100
Aire Comprimido	100-300	1-24 h	5-15 min	30-60 Wh/kg	0	55-75	25-40	550-2400
Hidrógeno	0.001-50 MW	> 24 h	min	-	0.50%	50	-	
Batería Ion-Li zebra NaS	50	min-h	variable	250 Wh/kg	20	90	5 años litio 10 NaS	200
Batería flujo redox	7 a 10	>10 h	ms	50 Wh/kg	0,1	85-92	>30	
Supercapacitores	0.01-1	ms-min	ms	0.1-15 Wh/kg	2-40	95	>20	440
Bobina Superconductora	0.01-10	ms-5 min	ms	0.05-5 Wh/kg	2-40	95	>20	500

Anexo 2. Comparativa de sistemas de almacenamiento.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de cada tecnología.

Tecnología.	Ventajas	Desventajas
Hidráulica	Gran adaptabilidad con otras tecnologías, gran capacidad de almacenamiento y bajos costo de producción	Alto costo de inversión, altos costos de mantenimiento, depende de elementos ambientales, lenta respuesta a cambios de carga.
Volante de Inercia	Gran densidad de potencia y energía, tiempos de respuesta.	Alto costo de implementación, tecnología en desarrollo.
Aire Comprimido	Gran capacidad de almacenamiento, de fácil adaptación al sistema de transmisión, versatilidad en capacidad	Bajo rendimiento en general, exceso de equipos auxiliares como secadores de aire enfriadores y filtros.
Hidrógeno	Sistema de respuesta rápida a cambios de carga, recursos de transformación abundantes.	Tecnología en desarrollo, altos costos de producción, bajas eficiencias, riesgos de seguridad.
Batería: Ion-Li zebra NaS	Gran capacidad de respuesta, sistema en desarrollo con grandes avances para sistemas híbridos de movilidad y micro-redes, alta densidad y potencia, menor velocidad de descarga, bajo mantenimiento, peso y volumen menor, ideal para micro-redes.	Requiere de servicios auxiliares para controlar la temperatura, alto costo de inversión a potencias de mediana escala
Batería flujo redox	Eficiencia por encima del 85%, gran capacidad de respuesta, puede llegar a funcionar por encima de los 10000 ciclos, más de 15 años de vida estimada, baja o nula descarga, amplias aplicaciones para la red eléctrica.	Limitado rango de temperatura de trabajo, entre 0 y 45°C, baja densidad de potencia, las bombas de recirculación del electrolito deben ser cambiadas, aproximadamente de 7 a 10 años, alto costo en el electrolito y la membrana de intercambio de protones que podría llegar a equipararse con su larga vida útil.
Supercapacitores	Gran velocidad de respuesta ante cambios de carga, alta densidad de potencia, miles ciclos de carga y descarga, larga vida útil	Tecnología en desarrollo, baja densidad de energía, su nivel de auto descarga es alto, costos de implementación elevados
Bobina Superconductora	No existe retraso entre carga y descarga, energía de forma inmediata, eficiencias superiores al 95%, de fácil adaptabilidad.	Elevados costos, la necesidad de sistemas auxiliares de gran capacidad como el criogénico, materiales poco abundantes como la bobina superconductora, de compleja elaboración.