



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

# **Informe de vigilancia tecnológica en dispositivos de almacenamiento de energía producida por fuentes de energía renovables no convencionales**

**Bogotá  
Abril de 2018**

---

# GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

*Proyecto: Identificación de los elementos y requisitos mínimos necesarios para la formulación, estructuración e implementación de un Observatorio de Energía que recopile y analice información que conduzca a oportunidades de innovación para lograr los objetivos del PEN 2050*



Informe elaborado para la Unidad de Planeación  
Minero Energética - UPME  
**Bogotá Abril de 2018**

*Grupo de Investigación en  
el Sector Energético Colombiano GRISEC  
Universidad Nacional de Colombia*

**PROYECTO IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS Y REQUISITOS  
MÍNIMOS NECESARIOS PARA LA FORMULACIÓN, ESTRUCTURACIÓN E  
IMPLEMENTACIÓN DE UN OBSERVATORIO DE ENERGÍA QUE RECOPILE  
Y ANALICE INFORMACIÓN QUE CONDUZCA A OPORTUNIDADES DE  
INNOVACIÓN PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS DEL PEN 2050**

**REPÚBLICA DE COLOMBIA**

Germán Arce Zapata – Ministro de Minas y Energía  
Jorge Alberto Valencia Marín – Director Unidad de Planeación Minero  
Energética UPME  
Carlos García - Subdirector de Demanda, Unidad de Planeación Minero  
Energética UPME

**EQUIPO DE TRABAJO DEL PROYECTO**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
Grupo de Investigación en el sector energético colombiano GRISEC  
Modelamiento Y Análisis Energía Ambiente Economía  
InTIColombia.

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA  
Instituto de Prospectiva de la Universidad del Valle

CORPORACIÓN CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS  
Director de proyecto: Omar Prias, Universidad Nacional de Colombia Sede  
Bogotá.

**EQUIPO DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DE EJERCICIOS DE  
VIGILANCIA TECNOLÓGICA**

Grupo de Investigación en el Sector Energético Colombiano GRISEC,  
Unversidad Nacional de Colombia

Director: Omar Prias  
Asesora Metdológica: Jenny Marcela Sánchez Torres  
Coordinación: David Bernardo Rojas Rodríguez  
Vigías Tecnológicos: Jair Armando Castañeda Rodríguez, Laura Milena  
Cruz Moreno, Luis Rafael de la Rosa Ramos Ramos, Sergio Andrés  
Rodríguez Blanco, Oscar Darío Zambrano.  
Apoyo: Laura Marcela Quiroga Calderón

## Contenido

### Presentación

### 1. Resumen Ejecutivo y conclusiones

### 2. Introducción

### 3. Almacenamiento de Energía

- 3.1. ¿Qué es almacenamiento de energía?
- 3.2. Importancia del almacenamiento en la generación con energías renovables.
- 3.3. Ventajas del almacenamiento para la seguridad energética y la descentralización del mercado energético.
- 3.4. Consideraciones de la generación con energías renovables en el almacenamiento de energía

### 4. Tendencias en almacenamiento de energía para Energías Renovables

- 4.1. Baterías
  - 4.1.1. Definición
  - 4.1.2. Parámetros Eléctricos
  - 4.1.3. Tipos de Baterías
- 4.2. Super/Ultracapacitores
  - 4.2.1. Definición
  - 4.2.2. Parámetros Eléctricos
  - 4.2.3. Tipos de Supercondensadores
- 4.3. Bobinas Superconductoras
  - 4.3.1. Definición
  - 4.3.2. Parámetros eléctricos
 

*Dentro de los parámetros eléctricos que permiten su correcto dimensionamiento en diferentes aplicaciones, se encuentran los siguientes:*
  - 4.3.3. Tipos de Bobinas Superconductoras
- 4.4. Sistemas de Almacenamiento de Energía Híbrido

### 5. Oportunidades y barreras en el mercado del Almacenamiento de Energía en Colombia

### 6. Asociaciones Internacionales para la Investigación en Almacenamiento de Energía

### 7. Referencias



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

# Presentación

Bogotá  
Abril de 2018



## Presentación

El Plan Energético Nacional 2050 (PEN 2050) se presentó en el 2015 como una base para la implementación de una política energética colombiana a largo plazo. En este documento, se realiza una revisión de los cambios técnicos, de negocios, aumento de la cobertura, garantía del suministro, diversificación de la canasta energética y aumento de la competitividad como elementos modeladores del futuro energético del país. De igual manera se hace un análisis de la relación economía – energía en Colombia, se estudian las perspectivas del mercado de los hidrocarburos y se plantea un escenario energético base nacional a 2050 y cuatro escenarios alternativos.

Teniendo como foco el PEN 2050, en el marco del proyecto Universidad Nacional - UPME para la "Identificación de los elementos y requisitos mínimos necesarios para la formulación, estructuración e implementación de un Observatorio de Energía que recopile y analice información que conduzca a oportunidades de innovación para lograr los objetivos del PEN 2050", se estructuraron un conjunto de ejercicios de vigilancia tecnológica para identificar las tendencias actuales asociadas con las variables principales que modelan los escenarios energéticos del PEN a 2050.

En consecuencia, el presente trabajo recoge los resultados del ejercicio de vigilancia tecnológica en sistemas de almacenamiento para energías renovables. El ejercicio se desarrolló basado en la oportunidad de la implementación de las energías renovables como alternativa para la seguridad energética en Colombia y como opción para aumentar la cobertura del servicio de energía eléctrica en el país a través del almacenamiento de energías renovables en Zonas no Interconectadas (ZNI). Dichos aspectos sintetizan dos de los principales objetivos del Plan Energético y se relacionan con políticas que promueven la utilización de las energías renovables, entre las que se encuentra la ley 1715 del 2014.

Dado que uno de los principales obstáculos para que las energías renovables (como la Solar fotovoltaica y la Eólica) se adapten con mayor rapidez, es la intermitencia de las condiciones climatológicas, el problema se limita a la capacidad de almacenamiento de esta energía en los periodos de mayor producción. En consecuencia, este documento se centra en explicar las tendencias y características de las tecnologías de almacenamiento de energía que se han desarrollado en los últimos años y cómo dichas tecnologías podrían adaptarse al contexto energético colombiano.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

# 1. Resumen Ejecutivo

Bogotá  
Abril de 2018

## 1. Resumen Ejecutivo y conclusiones

La producción de energía a través de fuentes renovables se ha expandido por todo el mundo. Por esto, las Energías Renovables (ER) se han convertido en un factor clave para la confiabilidad del suministro en países como Estados Unidos, China e India, los cuales han aumentado su capacidad de generación con estas fuentes de energía en los últimos años. De esta manera, las energías renovables han alcanzado grandes niveles de producción, y las tecnologías de almacenamiento de energía actuales se han refinado con el fin de crear las condiciones necesarias para una implementación eficiente. De acuerdo con el reporte de la Agencia Internacional de Energía (IEA), en 2016 la nueva capacidad de energía solar fotovoltaica en todo el mundo creció en un 50%, llegando a más de 54 GW, este mismo año la capacidad eólica conectada a la red alcanzó los 466 GW, llegando a representar casi el 4% de la electricidad mundial (OCDE & IEA, 2017).

Gracias a esto, el mercado de generación de energías renovables ha crecido y se ha fortalecido a través de la integración de soluciones que permiten el aprovechamiento eficiente de la energía limpia. Sin embargo, en ocasiones no es posible utilizar esta energía de manera instantánea una vez se produce, situación que ha creado la necesidad de almacenar la energía que se produce en horas de baja demanda. Esta opción facilita la gestión de la energía en el momento adecuado, y además permite la existencia de reservas para periodos de escasez, como por ejemplo el fenómeno del Niño, en el caso de Colombia, que reduce los niveles de los embalses y afecta la generación de energía. El almacenamiento de energía no solo es un soporte para los sistemas de grandes potencias, sino también un elemento primordial para la implementación de soluciones energéticas descentralizadas, como la generación distribuida y las microrredes, que abren paso a nuevos mercados, generando una mayor independencia en el suministro de energía.

Actualmente el mercado del almacenamiento de energía ha ampliado sus horizontes, desarrollando diferentes tecnologías que han aumentado paulatinamente su eficiencia y vida útil. Por ejemplo, estudios recientes estiman que tecnologías como las bobinas superconductoras pueden llegar a eficiencias de hasta el 98%, con una vida útil de hasta 40 años, seguido en menor medida por los supercondensadores que pueden alcanzar eficiencias poco mayores al 95% con vida útil de hasta 20 años, decayendo en eficiencia y vida útil con baterías de iones de litio (Li-ion), plomo ácido (Pb), níquel cadmio (Ni-Cd), níquel-Metal Hidruro (Ni-MH) entre otras, con eficiencias de 85-90% aproximadamente y vida útil de 10 a 15 años máximo (Xie & Chen, 2017). De acuerdo con el reporte publicado en 2017 por la Corporación Financiera Internacional (IFC, por sus siglas en inglés), acerca de las tendencias en almacenamiento de energía y la oportunidad en mercados emergentes, se espera que la implementación de tecnologías de almacenamiento de energía en los mercados emergentes de todo el mundo, crezcan más del 40 por ciento anual en la próxima década, agregando aproximadamente 80 GW de nueva capacidad de almacenamiento, a los 2 GW estimados existentes en la actualidad.

Motivado, por este contexto, en el presente informe se busca responder a la pregunta de vigilancia: ¿Cuáles son las principales características de las tecnologías más usadas para almacenamiento de energía producida por fuentes renovables, que se perfilan como alternativas factibles en el contexto colombiano?. Como respuesta a esta pregunta se encontró que tanto tecnologías clásicas de almacenamiento como otras más novedosas pueden presentar soluciones para contextos específicos relacionados con energías renovables. En el primer grupo encontramos las baterías, capaces de almacenar grandes cantidades de energía. En el segundo, los supercondensadores con ventajas en cuanto a densidad de potencia y resistencia a fuertes variaciones de corriente, y las



bobinas superconductoras que cuentan con ambas características pero un costo de fabricación aún bastante alto en comparación con las tecnologías anteriores, lo que no ha permitido su incursión comercial. Así mismo, los sistemas de almacenamiento híbrido, basados en dos tipos de tecnologías, son bastantes prometedores. Dentro de estos, la unión batería-supercondensador es la más llamativa debido a sus características complementarias, pues el sistema cuenta con gran capacidad de almacenamiento, soporta picos de corriente altos (típicos de la generación con energías renovables) y tiene una vida útil más alta.

### **Conclusiones:**

- El almacenamiento de Energía a gran escala es un factor relevante para lograr una gestión adecuada de la demanda, así como gestionar la energía de forma eficiente a lo largo de la curva de demanda (almacenamiento en horas valle e inyección en horas pico), evitando la volatilidad de los precios en el mercado cuando hay escasez de generación y estableciendo precios de energía más convenientes para el usuario.
- Dentro de los sistemas de almacenamiento capaces adaptarse a las necesidades de las energías renovables, se encuentran las baterías, los supercondensadores y las bobinas superconductoras. Las baterías, aunque cuentan con una alta densidad de energía, son dispositivos con baja capacidad para soportar picos de corriente, característica que ha venido mejorando con el tiempo aunque sigue siendo reducida en comparación con otras tecnologías. Las bobinas superconductoras y los supercondensadores son dispositivos que presentan características de composición que los hacen más amigables con el medio ambiente que las baterías, y logran eficiencias más cercanas al 100%. Los sistemas de almacenamiento híbridos se presentan también como una alternativa óptima para obtener las mejores características de cada una de las diferentes tecnologías de almacenamiento, a un costo razonable.
- El creciente desarrollo de las tecnologías de almacenamiento ha llevado a la mejora de los tiempos de carga y descarga, permitiendo almacenar energía a una mayor capacidad. En el caso de las energías renovables que poseen altos picos de generación, los supercondensadores y las bobinas superconductoras son capaces de captar esta energía en cuestión de segundos. Los dispositivos de almacenamiento de energía, como los supercondensadores y las bobinas superconductoras, mejoran la calidad de la energía y suavizan los picos de potencia en el sistema (Zhou et al., 2018)
- El almacenamiento de energía puede convertirse en un nuevo eslabón dentro de la cadena de suministro eléctrico, con sistemas basados en generación, almacenamiento y distribución, únicamente. Esto minimiza la necesidad de los sistemas de transmisión, y reduce los costos de infraestructura en los sistemas de potencia (Berrada, Loudiyi, & Zorkani, 2016).
- El almacenamiento de energía debe contar con un sistema de control y comunicaciones que gestione la información de la generación producida, y el estado de carga de los dispositivos almacenadores de energía. Esta gestión debe producir un balance entre la demanda y la energía proporcionada a la carga de acuerdo a los recursos disponibles en diferentes periodos de tiempo, dando como resultado un aplanamiento de la curva de demanda.
- Teniendo grandes reservas de almacenamiento se pueden ampliar las fronteras del mercado energético a países vecinos, como es el caso de la empresa de energía CELSIA que explora la viabilidad de instalar sistemas de almacenamiento en Colombia, Panamá y Costa Rica.


- La regulación del mercado del almacenamiento de energía es la clave fundamental para su implementación a futuro, las fuentes renovables requieren almacenamiento, y la única forma para que los generadores de energías renovables consideren pertinente ésta opción, es que la regulación contemple el almacenamiento como un requisito obligatorio en la implementación de energías renovables.
- Empresas como XM e ISA han ampliado sus horizontes, empezando desde el 2015 y 2016 respectivamente, con jornadas de capacitación técnicas, buscando generar redes de almacenamiento a gran escala y presentando propuestas para la regulación del mercado del almacenamiento de energía.
- El interés en el desarrollo del almacenamiento ha creado alianzas y asociaciones internacionales entre países como: China, Estados Unidos, India y Alemania. Estas buscan, entre otras cosas, posicionar el mercado del almacenamiento de energía y que este contribuya significativamente a lograr penetraciones mucho más altas de energía renovable en todo el mundo, promoviendo un mayor acceso a la energía.
- Es tal el interés en el almacenamiento de energía, que la agencia internacional estadounidense de comercio y desarrollo (UDSTA, por sus siglas en inglés), está financiando un proyecto para estudiar la viabilidad de los mercados de almacenamiento de energía a gran escala para Colombia, Brasil y México, con el fin de establecer los modelos de negocios que se implementarán en los próximos años en estos países.
- El estudio de los modelos de negocio para el mercado del almacenamiento es fundamental para explorar las oportunidades de este mercado en Colombia. Dado que Colombia cuenta con zonas no interconectadas, el almacenamiento es recomendable en estas zonas, las cuales pueden contar con alto potencial de generación renovable, y donde la transmisión podría llegar a presentar amplias dificultades técnicas.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

## 2. Introducción



Bogotá  
**Abril de 2018**

## 2. Introducción

A partir de la gran inversión en capacidad de generación con energías renovables, en países como China, Estados Unidos, Alemania e India, el mercado de insumos para la implementación de estas tecnologías ha crecido rápidamente, lo que ha reducido en gran medida los costos de algunos dispositivos, como los generadores eólicos y solares, así como la infraestructura para su correcto emplazamiento. Esto ha motivado a Colombia a implementar algunas soluciones de tipo renovable dentro de su Sistema Interconectado Nacional, a la vez que se han establecido leyes para promover la participación de energías renovables en el mercado, como la Ley 1715 de 2014. Esta ley promueve la implementación de Energías Renovables a través del autoconsumo y la generación distribuida, tanto para estratos 1, 2 y 3, como en zonas no interconectadas del país, a través de incentivos tributarios. Esto ha impulsado a empresas del sector eléctrico como CELSIA, XM e ISA, a desarrollar proyectos y jornadas de capacitación en almacenamiento de energía para generación renovable, con el fin de lograr un máximo aprovechamiento de la energía producida a través de estas fuentes.

Como ejemplo, CELSIA inició la operación en el último trimestre del 2017 de la primera planta de energía solar a gran escala del país, la cual posee una capacidad de 9,8 MW y generará 16,5 GWh al año de energía. Este proyecto creó la necesidad de explorar la viabilidad de establecer opciones de almacenamiento de energía, dando como resultado una alianza con el Centro de Energía Avanzada de Canadá (AEC, por sus siglas en inglés), con el fin de identificar y analizar los factores tecnológicos, normativos, económicos y ambientales que influyen en la viabilidad, y afectan el mercado del almacenamiento de energía en Colombia. XM por su parte inició esta labor en 2015, mediante jornadas en las que se evalúan aspectos técnicos para proyectos en almacenamiento de energía y se buscan soluciones confiables y costo-competitivas que faciliten las nuevas demandas del mercado nacional, para abrir sus fronteras internacionales. De forma similar, ISA inició en mayo del año pasado, sus jornadas de almacenamiento en las cuales se plantearon las perspectivas para la incorporación del almacenamiento de energía en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Dentro de este contexto, el objetivo principal de este informe es determinar las tendencias globales en almacenamiento de energía para proyectos en energías renovables, y evaluar qué opciones son factibles para su implementación en el sistema eléctrico colombiano, con participación de energías renovables de acuerdo con lo establecido en el PEN2050.

### Tema y Objetivos

**Tema Principal:** Tecnologías, características y costos del almacenamiento de energía con fuentes de energía renovables.

**Ámbito de Aplicación:** Modelo tecnológico del sector eléctrico.

#### Objetivo principal del informe:

- Generar información referente a las nuevas tecnologías de almacenamiento de Energía con fuentes de generación renovables enfatizando en dispositivos de almacenamiento que se perfilen como alternativas factibles en el contexto energético colombiano, para promover la consecución de los objetivos del PEN 2050 asociados al suministro confiable, la diversificación de la canasta energética e incremento de la cobertura energética en el país.

#### Objetivos específicos del informe:

- Identificar y caracterizar las tecnologías emergentes con alta dinámica de innovación y desarrollo, para el almacenamiento de energía con fuentes renovables no convencionales en Colombia, como la solar fotovoltaica y eólica.

- Identificar las tendencias del mercado asociadas a tecnologías de almacenamiento de Energía con fuentes de energías renovables como la solar fotovoltaica y eólica.
- Identificar las dinámicas mundiales en términos de adopción de tecnologías de almacenamiento, usadas en la integración de Energías Renovables a los sistemas interconectados, y dentro de diferentes soluciones energéticas .





GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

### **3. Almacenamiento de Energía**



Bogotá  
**Abril de 2018**

### 3. Almacenamiento de Energía

Este capítulo presenta una breve introducción de los conceptos de almacenamiento de energía, así como sus rangos de aplicación en términos de potencia y energía. También se consideran los efectos del almacenamiento a gran escala en el país, sus ventajas para la seguridad energética y cómo su implementación contribuiría a la descentralización del mercado eléctrico a futuro. Por otro lado, se describen los tipos de dispositivos de acuerdo a su forma de almacenamiento (químico, eléctrico o mecánico), diferenciando los más usados en la implementación de soluciones con energías renovables. Por último, se establecen las características más influyentes de la generación renovable, que hacen que los dispositivos de almacenamiento requieran de condiciones especiales para su correcta integración al sistema.

#### 3.1. ¿Qué es almacenamiento de energía?

Un sistema de almacenamiento de energía está compuesto por uno o varios dispositivos capaces de almacenar carga eléctrica, ya sea a través de procesos químicos como las baterías, y eléctricos como los supercondensadores y bobinas superconductoras. Los dispositivos almacenadores de energía se clasifican de acuerdo a sus características, su tecnología de fabricación, la rapidez de carga y descarga, la cantidad de energía almacenada, el nivel de tensión con el cual opera, la temperatura máxima de operación, la densidad de potencia, o dependiendo de su aplicación (J.I. San Martín<sup>1</sup>, 2011).

#### 3.2. Importancia del almacenamiento en la generación con energías renovables.

Dado que la generación basada en energías renovables, en particular la energía solar y la energía eólica, dependen en su mayoría de las condiciones meteorológicas, presentan un ciclo de producción intermitente que puede llegar a causar problemas de abastecimiento e, incluso, puede llegar a dañar algunos equipos del sistema eléctrico debido a las fluctuaciones de corriente. Así mismo, con la integración de soluciones energéticas en generación distribuida, las microredes y las nuevas políticas que promueven el autoconsumo de energía y, con el fin de alcanzar una mayor descentralización del mercado eléctrico, se hace necesario el almacenamiento de energía a una mayor escala. Esto ha promovido una mayor investigación en el desarrollo de tecnologías más robustas para almacenamiento de energía, capaces de soportar picos de corriente elevados, altas temperaturas, menores tiempos de carga/descarga, mayor capacidad de almacenamiento y una vida útil más larga (López Velasquez, 2014).

Una de las principales desventajas que ha detenido la penetración masiva de las energías renovables son los costos asociados al almacenamiento de grandes cantidades de energía, por lo cual este ejercicio de vigilancia tecnológica establece qué tecnologías de almacenamiento se están desarrollando con mayor rapidez y podrían representar una oportunidad para extender la implementación de Energías Renovables en el país.

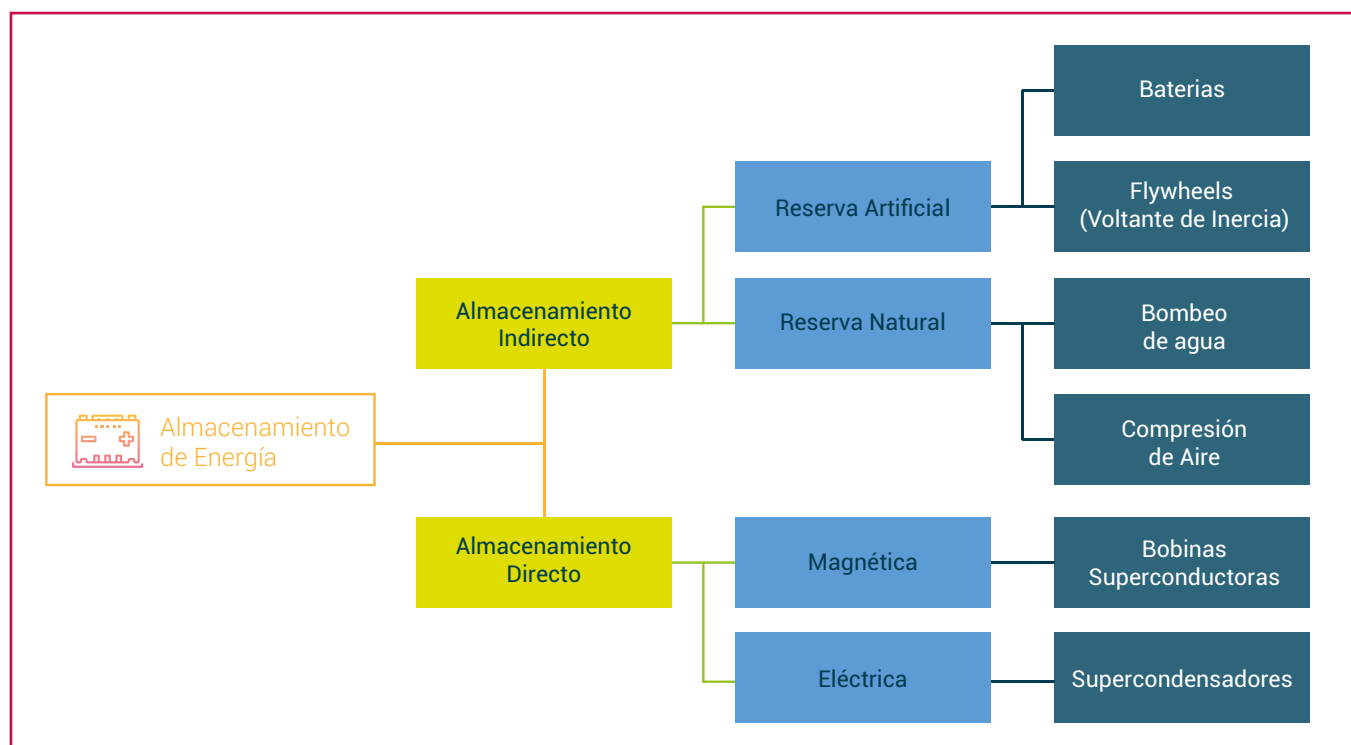
#### 3.3. Ventajas del almacenamiento para la seguridad energética y la descentralización del mercado energético.

La principal ventaja de un sistema de almacenamiento de energía es su capacidad de reserva para periodos en los cuales la producción de energía es baja o nula. En el caso de Colombia, este tipo de periodos se asocian a la presencia de fenómenos naturales que afectan la seguridad energética, como el fenómeno del niño que produce grandes sequías y disminuye el nivel de los embalses, de los cuales depende el país para su suministro energético.

Para Colombia el tema adquiere mayor pertinencia al considerar que el país cuenta con alta disponibilidad de recursos renovables y zonas de difícil acceso para el Sistema Interconectado Nacional (SIN), en donde el almacenamiento de energía se plantea como una de las soluciones más convenientes para esta problemática.

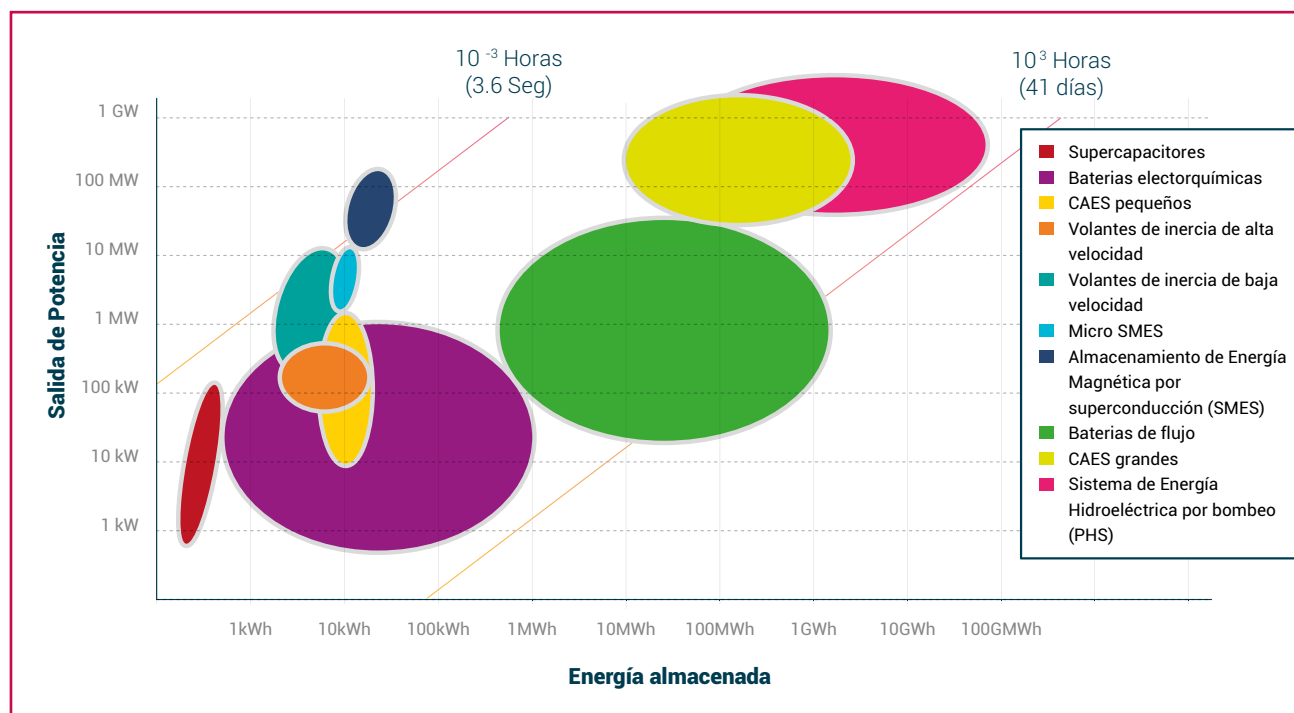
En respuesta al objetivo principal de este ejercicio de vigilancia, en la **Ilustración 1** se resume la información recolectada sobre la clasificación de las tecnologías de almacenamiento, de acuerdo con su forma de almacenar la energía.

**Ilustración 1.** Clasificación de las tecnologías de Almacenamiento



**Fuente.** (J.I. San Martín<sup>1</sup>, 2011)

Cada una de estas tecnologías se puede utilizar en diferentes aplicaciones de acuerdo con su capacidad de energía y de potencia. En la **ilustración 2**, se puede observar como las tecnologías de almacenamiento de compresión de Aire (CAES, por sus siglas en inglés) y de bombeo (PHS, por sus siglas en inglés) cumplen con rangos de potencia y de energía elevados, lo cual es ideal para un sistema de almacenamiento. Las baterías por su parte, están en un rango intermedio contando con gran capacidad de almacenamiento y en menor medida de potencia y finalmente los flywheels, supercondensadores y bobinas superconductoras, que cuentan con baja capacidad de almacenamiento, pero manejan potencias elevadas.

**Ilustración 2.** Rangos de aplicación de las tecnologías de Almacenamiento

**Fuente.** (J.I. San Martín<sup>1</sup>, 2011)

### 3.4. Consideraciones de la generación con energías renovables en el almacenamiento de energía

Las dos características más importantes, que diferencian la generación renovable de la generación convencional son:

1. La intermitencia de la generación de energía con fuentes renovables produce elevados picos de corriente, que pueden dañar sistemas de almacenamiento tradicionales con bajas densidades de potencia.
2. Las fuentes de generación basadas en energías renovables, como la solar y eólica, tienen altos picos de producción, por lo cual se requieren sistemas de almacenamiento que puedan tomar esta energía en el menor tiempo posible, con el fin de reservarla y utilizarla posteriormente.

A partir de estas consideraciones y para efectos de este informe, se han tenido en cuenta tecnologías que cumplen con los parámetros que caracterizan a la generación renovable, y que se hayan usado anteriormente en el contexto de generación renovable. El PHS y el CAES, aunque tienen características óptimas de energía y potencia, no son usadas comúnmente para almacenamiento de energías renovables como la solar y eólica, sino para sistemas de generación convencional como hidroeléctricas, debido a la estructura de funcionamiento, basado en bombeo de agua y compresión de aire respectivamente. Por lo anterior, este documento se centra en baterías, supercondensadores y bobinas superconductoras.



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

## **4. Tendencias en almacenamiento de energía para Energías Renovables**

Bogotá  
**Abril de 2018**



## 4. Tendencias en almacenamiento de energía para Energías Renovables

### 4.1. Baterías

#### 4.1.1. Definición

De acuerdo con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-RETIE, una batería de acumuladores es un equipo que contiene una o más celdas electroquímicas recargables. En más detalle y para efectos prácticos de este informe se ha ampliado esta definición tomada de (Tarascon & Armand, 2001).

"Una batería es un sistema de almacenamiento de energía a través de procedimientos electroquímicos y que tiene la capacidad de devolver dicha energía posteriormente casi en su totalidad, ciclo que puede repetirse un determinado número de veces. La energía eléctrica en la batería es almacenada o liberada a través de reacciones electroquímicas que transportan electrones entre electrodos, que se encuentran interiormente conectados por un electrolito para llevar cabo reacciones específicas de reducción/oxidación."

#### 4.1.2. Parámetros Eléctricos

Las baterías cuentan con parámetros eléctricos que facilitan su selección, de acuerdo con su aplicación. Dentro de los parámetros más relevantes que caracterizan a la batería se encuentran:

1. La tensión Nominal o de operación (Voltios)
2. Capacidad Nominal de la Batería (Amperios-Hora)
3. Auto-descarga (en porcentaje)
4. Vida Útil (Años)
5. Curva de profundidad de descarga

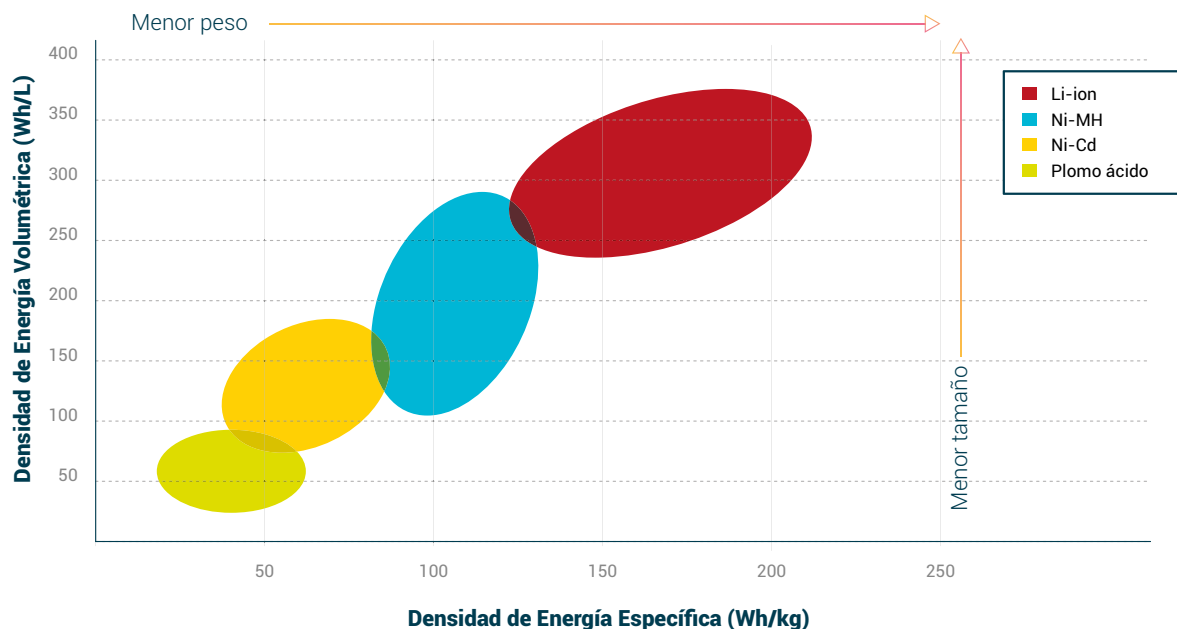
Con base en los dos primeros parámetros mencionados anteriormente, es posible verificar cuánta energía es capaz de almacenar dicha batería y qué parámetro corriente-tensión es capaz de soportar, para su correcta operación en los diferentes sistemas.

#### 4.1.3. Tipos de Baterías

Existe una amplia gama de tipos de baterías diferenciadas, básicamente, por su material de fabricación. Algunas de las más destacadas y utilizadas en sistemas con generación de energías renovables, son las siguientes:

1. Plomo Ácido (Pb)
2. Níquel Metal-Hidruro (Ni-MH)
3. Níquel-Cadmio (Ni-Cd)
4. Iones de Litio (Li-ion)

En la **ilustración 3**, es posible observar como el aumento de la densidad de energía específica, es reflejada en baterías más ligeras, mientras que a mayor densidad de energía se pueden obtener baterías mucho más pequeñas.

**Ilustración 3.** Comparación de densidad energética de los diferentes tipos de baterías.**Fuente:** (Janson, 2014)**Comparación por tipo de Batería**

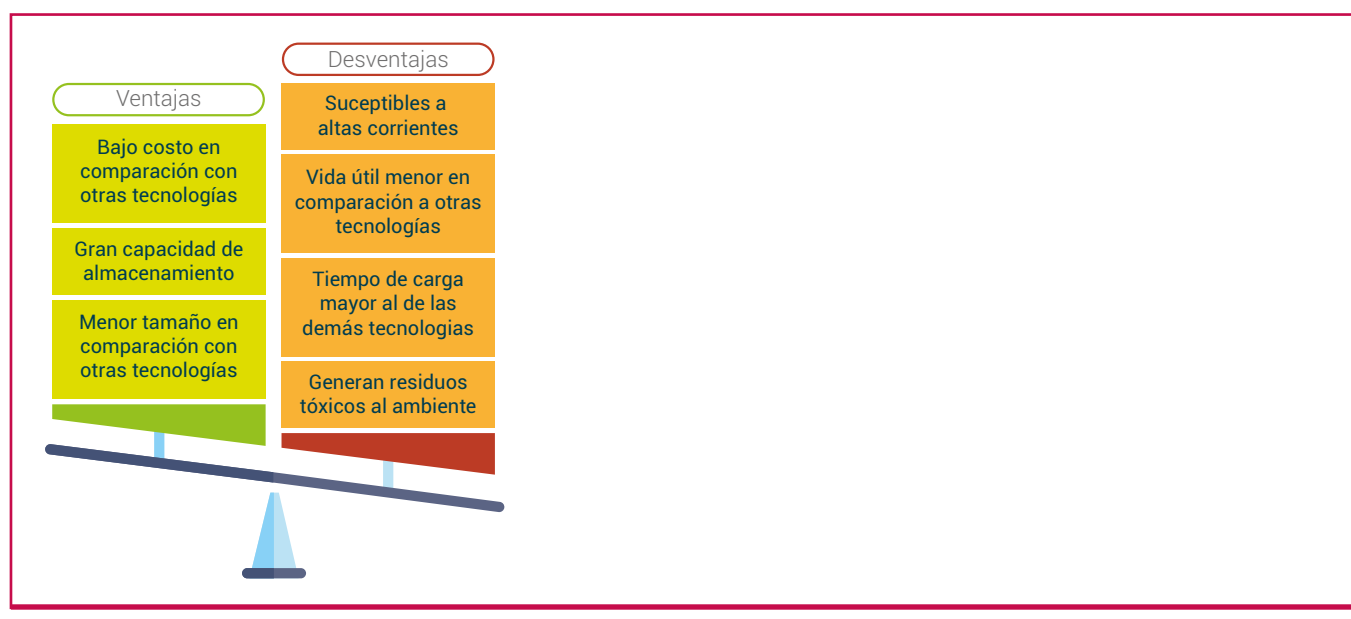
En la **tabla 1** se pueden observar las diferentes características de las baterías de plomo, níquel y litio. Cabe resaltar que la densidad de energía para las baterías de iones de litio es mayor, siendo capaz de almacenar más energía que las demás baterías. Además de no presentar autodescarga (efecto que reduce la capacidad de la batería en el tiempo y que es poco deseable), las baterías de iones de litio no requieren mantenimiento y presentan menores niveles de toxicidad que en el caso de las baterías de plomo y níquel, que alcanza hasta el 30%. Por último, uno de los factores críticos en los dispositivos de almacenamiento, es el tiempo de carga, que para las baterías está en el rango de horas, pero que para otros dispositivos de almacenamiento se encuentra en el rango de segundos.

**Tabla 1.** Características de los diferentes tipos de baterías.

Especificaciones	Pb	Ni-MH	Ni-Cd	Li-ion (Cobalto)	Li-ion	Li-ion
					(Manganeso)	(Fosfato)
Densidad de Energía (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-190	100-135	90-120
Resistencia Interna (mΩ)	<100	100-200	200-300	150-300	25-75	25-50
	12V	6V	6V	7,2V	Por Celda	Por Celda
Ciclo de Vida (80% descarga)	200-300	1000	300-500	500-1000	500-1000	1000-2000
Tiempo de Carga	8-16hr	1h	2-4hr	2-4hr	1hr o menos	1hr o menos
Auto-descarga/mes	5%	20%	30%	<10%	No Aplica	No Aplica
Tensión Nominal de la Celda	2V	1,2V	1,2V	3,6V	3,8V	3,3V
Mantenimiento	3-6 meses	30-60 días	60-90 días	No requiere	No requiere	No requiere
Toxicidad	Muy Alta	Muy Alta	Baja	Baja	No Aplica	No Aplica

**Fuente:** (Janson, 2014)

A partir de la **ilustración 4** se pueden identificar las ventajas y desventajas del almacenamiento basado en baterías en comparación con las demás tecnologías de almacenamiento en cuanto a costo, capacidad, tamaño, tiempo de carga y robustez frente a altas corrientes.

**Ilustración 4.** Ventajas y desventajas del almacenamiento con baterías

Grupo de Investigación en  
el Sector Energético Colombiano GRISEC  
Universidad Nacional de Colombia

**Fuente:** Elaboración Propia (Janson, 2014)

## 4.2. Super/Ultracapacitores

### 4.2.1. Definición

Los Supercondensadores son dispositivos usados para el Almacenamiento de Energía, haciéndolo de forma similar a un capacitor tradicional, con la diferencia de que la carga no se acumula en dos conductores, sino en la interfaz entre la superficie de un conductor y una solución electrolítica. Los electrodos del supercondensador están hechos con materiales de superficie altamente efectivos, tales como aerogel poroso o carbono poroso. Esto le proporciona al supercondensador una mayor capacidad de almacenar cargas eléctricas (Abbey & Joos, 2007).

### 4.2.2. Parámetros Eléctricos

Los supercondensadores cuentan con parámetros eléctricos equivalentes a los de los capacitores tradicionales y qué se utilizan para dimensionar el sistema de almacenamiento. Entre estos se encuentran:

1. La Capacitancia
2. La Tensión Nominal
3. La Resistencia Serie Equivalente
4. La Energía Almacenada

### 4.2.3. Tipos de Supercondensadores

Los supercondensadores, al igual que las baterías, se clasifican de acuerdo con su material de composición. Están compuestos por carbón, material poroso y biodegradable que proporciona un área mayor, lo que se refleja en una mayor capacitancia. El carbón posee una estructura que lo hace moldeable en diferentes formas pudiéndose encontrar en fibras, partículas y aerogel, como se puede observar en la **Tabla 2**, en donde también se puede evidenciar que las magnitudes de densidad de energía en el supercondensador son bastante pequeñas comparadas con las baterías, pero su rango de voltaje es mayor. Estos dos factores hacen que este dispositivo pueda almacenar poca energía, pero pueda resistir picos altos de potencia, lo que lo hace ideal en sistemas de potencia de gran capacidad, donde los picos de corriente podrían dañar una batería convencional. Es importante enfatizar que hace 20 años era impensable ó poco común hallar condensadores de más de 2 Faradios, sin embargo hoy es posible encontrar en el mercado supercondensadores con una capacitancia de hasta 5000 Faradios y mayores.

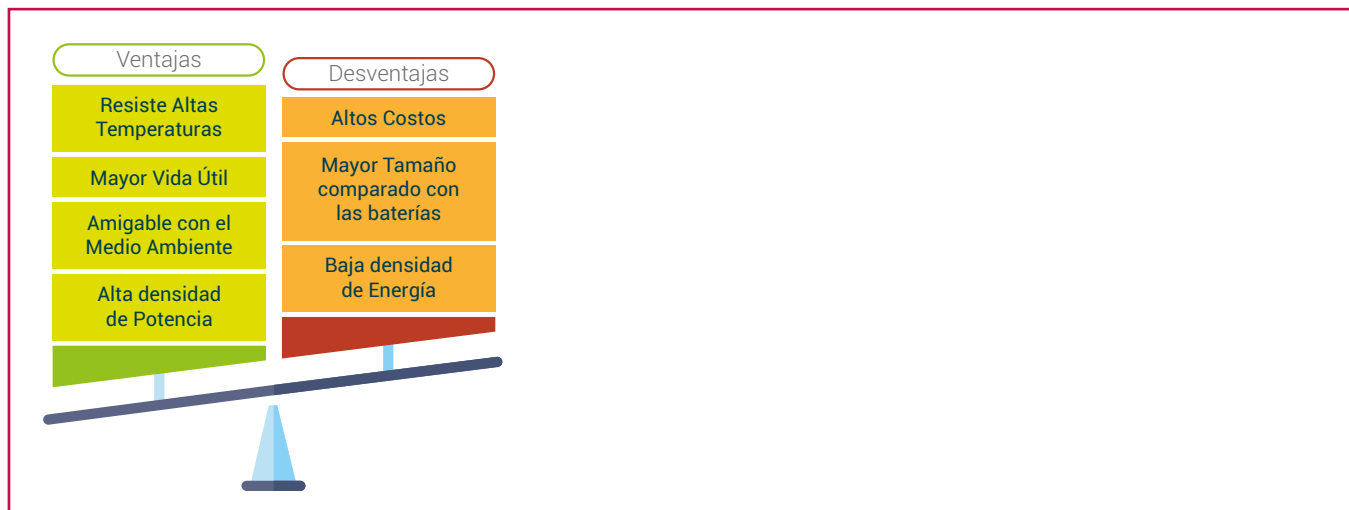
**Tabla 2.** Características eléctricas de los supercondensadores por material

Tipos de Compuestos	Nombre del dispositivo	Rango de Capacitancia [F]	Rango de Voltaje	Densidad de Energía [Wh/kg]	Densidad de Potencia [KW/Kg]
	Por Fabricante		[v]		
Fibras de Carbono	Boostcap	abr-00	2.5-2.7	0.868-5.52	1.35-26
	Boostcap Modulen	52-500	15-125	1.9-3.98	4.4-14
Carbón Particulado	Electric Double Layer Capacitor Module	58-500	13.8-210	1.5-4.5	1
	Electric Double Layer Capacitor	350-3200	2.3-2.5	1.5-4.5	1
	EDLC Pseudocapacitor Module	1.5-5000	2.3-340	1.67-8.75	5.2
	Supecapacitor	0.075-1.8	2.3-5.5	0.05-10	0.01-10.3
	UPS Type	2.86-0.23	0.8-200	0.556-2.778	0.9-1
	Super Capacitors	0.022-100	2.7-7.0	0.5	0.005-0.01
	Gdd Capacitor	800-2000	3	3.1-4.4	0.127-0.392
Aerogel de Carbon	Power Stor	0.22-100	2.5-5.5	0.4	-
	SuperCap	100-3000	2.5-14	1.5-4.7	0.25
Híbridos	Hybrid (DSCC) Capacitor Banks Capattery	0.001-1.5	5.5-125	0.1	30
	Capacitors Modules	100-500	16-52	2.58-7.3	38-42

**Fuente:** (Guerrero, Romero, Barrero, Milanés, & González, 2009)

En la **Ilustración 5**, se resaltan algunas de las ventajas y desventajas del almacenamiento con supercondensadores, entre las que se encuentran su alta densidad de potencia que le permite resistir altas corrientes pico generadas por energías renovables, su mayor vida útil que duplica la de las baterías y su capacidad de resistir altas temperaturas evitando el mantenimiento que es indispensable en las baterías. Algunas de las restricciones para la implementación de estas tecnologías son su tamaño y costo que aún siguen siendo elevados.



**Ilustración 5.** Ventajas y desventajas del almacenamiento con supercondensadores

**Fuente:** Elaboración Propia (Guerrero, Romero, Barrero, Milanés, & González, 2009)

### 4.3. Bobinas Superconductoras

#### 4.3.1. Definición

“La bobina superconductora (SMES, por sus siglas en inglés) es una tecnología de Almacenamiento de Energía en forma de campo magnético, el cual es creado por el flujo de una corriente DC. El conductor que lleva la corriente opera a una temperatura criogénica donde se convierte en un superconductor, por lo que virtualmente no tiene pérdidas resistivas, produciendo el campo magnético”(Buckles & Ilassenzahl, 2000).

#### 4.3.2. Parámetros eléctricos

Dentro de los parámetros eléctricos que permiten su correcto dimensionamiento en diferentes aplicaciones, se encuentran los siguientes:

1. Energía Almacenada
2. Potencia Máxima
3. Corriente Máxima
4. Tiempo de Descarga
5. Densidad de Campo Máximo
6. Diámetro medio de la Bobina

#### 4.3.3. Tipos de Bobinas Superconductoras

Como se puede observar en la Tabla 3 las bobinas superconductoras se pueden clasificar en dos grupos: bobinas superconductoras de bajas temperaturas (LTS, por sus siglas en inglés), y bobinas superconductoras de alta temperatura (HTS, por sus siglas en inglés). La tecnología LTS es más madura y comercial, mientras el HTS se encuentra actualmente en desarrollo. Entre las características de las bobinas superconductoras se destaca una densidad de potencia relativamente alta, tiempo de

respuesta rápido (nivel de milisegundo), tiempo de descarga total (menos de 1 min). La bobina es sensible a pequeñas variaciones de temperatura que pueden causar la pérdida de energía(Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015).

**Ilustración 5.** Ventajas y desventajas del almacenamiento con supercondensadores

Tipo de Bobina Superconductora	Potencia (MW)	Eficiencia	Vida Útil
LTS	0,1-10	95-98%	30 años
HTS	100	95-98%	30 años

**Fuente:** Elaboración Propia (Guerrero, Romero, Barrero, Milanés, & González, 2009)

**Ilustración 6.** Ventajas y desventajas del almacenamiento con bobinas superconductoras



**Fuente:** Fuente. Elaboración propia (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015).

Teniendo en cuenta las características básicas de cada una de las tecnologías, en la **Tabla 4** se presenta una síntesis de las características de capacidad, eficiencia, tiempo de respuesta, ciclo de vida y costos de cada una de las tecnologías. Aquí se puede resaltar que las bobinas superconductoras son los dispositivos que cuentan con una mayor eficiencia, sin embargo, sus costos de fabricación son tan altos que no se pueden estimar debido a que es una tecnología todavía en crecimiento. Las baterías por su parte cuentan aún con la mayor capacidad de almacenar la energía al comparar con las demás tecnologías, mientras los supercondensadores presentan la mayor densidad de potencia, siendo las más óptimas para aplicaciones donde se manejen altas potencias y altas corrientes.

**Tabla 4.** Comparación de los diferentes sistemas de Almacenamiento de Energía.

Tipo	Eficiencia (%)	Densidad de Energía (Wh/kg)	Densidad de Potencia (W/kg)	Tiempo de Respuesta (ms)	Ciclo de Vida (tiempo)	Costo (\$/kWh)
Baterías	60-80	20-200	25-1000	30	200-2000	150-1300
SMES	95-98	30-100	1e4-1e5	5	1,00E+06	Alto
SuperCap	95	<50	4000	5	>50000	250-350

**Fuente:** (Luo et al., 2015).

#### 4.4. Sistemas de Almacenamiento de Energía Híbrido

Los sistemas de almacenamiento híbrido poseen dos o más tipos de tecnologías de almacenamiento de energía. Algunos de los sistemas de almacenamiento híbrido usados comúnmente en esquemas con fuentes renovables son el sistema batería-supercondensador, y el sistema batería de litio – batería de níquel. El primero de ellos resulta bastante prometedor, ya que tiene características complementarias de densidad de energía y densidad de potencia. Las baterías son capaces de almacenar grandes cantidades de energía, sin embargo, son sensibles a cambios bruscos de corriente; por su parte, los supercondensadores poseen una densidad de energía pequeña y una densidad de potencia más alta, siendo capaces de resistir altos picos de corriente, que podrían dañar una batería convencional. Al construir el sistema de almacenamiento híbrido con baterías y supercondensadores, es posible mejorar la vida útil de ambos dispositivos y complementar sus ventajas (Kyriakopoulos & Arabatzis, 2016).



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

## **5. Oportunidades y barreras en el mercado del Almacenamiento de Energía en Colombia**

Bogotá  
Abril de 2018

## 5. Oportunidades y barreras en el mercado del Almacenamiento de Energía en Colombia

Dada la importancia del almacenamiento de energía para la seguridad energética y para lograr la implementación eficaz de las energías renovables, algunas empresas de energía colombianas ya están desarrollando jornadas para capacitarse en temas de almacenamiento. Dichas acciones se realizan con el fin de promover la ejecución de proyectos que permitan establecer la reglamentación para este nuevo segmento del mercado que en algunos casos reemplazaría a la transmisión, y con el fin de fortalecer las redes del país.

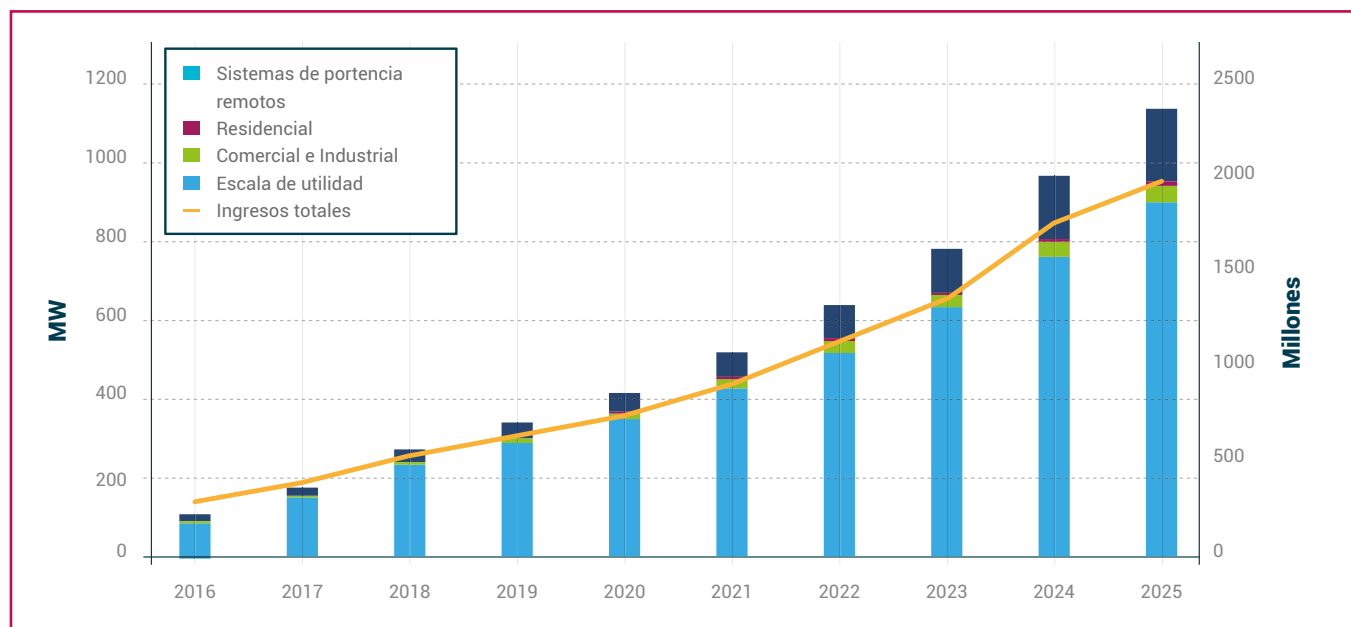
**Tabla 5.** Jornadas Técnicas de Capacitación en Almacenamiento de Energía para empresas del Sector Eléctrico.

EMPRESA	TÍTULO	TIPO	AÑO	PROPUESTAS
XM	Almacenamiento de Energía. <i>Menos Restricciones, Más Energía</i>	Jornadas Técnicas de Capacitación	2015	Implementar una red de Almacenamiento para eliminar restricciones y aportar servicios auxiliares
ISA	Perspectivas para la incorporación del Almacenamiento de Energía en el SIN	Jornadas Almacenamiento CNO	2017	Propuesta para la reglamentación integral del Almacenamiento de Energía en Colombia
CELSIA	Alianza con el centro de Energía Avanzada de Canadá	Alianza	2016	Explorar la viabilidad de Establecer opciones de Almacenamiento de Energía en Colombia, Panamá y Costa Rica

**Fuente:** (Restricciones & Energía, 2015) y (ISA, 2017).

Respecto a las oportunidades de almacenamiento de energía en América Latina, se puede observar en la **ilustración 7**, que una porción significativa de la nueva capacidad de almacenamiento se espera que provenga de sistemas de potencia remotos. Se prevé que la mayor parte de esta nueva capacidad estará en isla física en sistemas de microred. Además, se estima que los ingresos en éste segmento del mercado en América Latina podría alcanzar los 2000 millones de dólares, según estudios de la Corporación Financiera Internacional (IFC, por sus siglas en inglés) (Eller & Gauntlett, 2017).



**Ilustración 7.** Proyecciones Anuales del Almacenamiento de Energía en América Latina, capacidad de potencia e Ingresos en los segmentos del Mercado

**Fuente:** (Eller & Gauntlett, 2017)

### Barreras de entrada en al Mercado del Almacenamiento en América-Latina

Con Base al reporte de la Corporación Financiera Internacional (Eller & Gauntlett, 2017), dentro de las barreras que están limitando la entrada al mercado de almacenamiento de energía en América Latina, se encuentran las siguientes:

1. La actual inestabilidad económica de estos países.
2. Los mercados regulatorios existentes limitan la Innovación
3. La Infraestructura Inestable de las redes
4. El Acceso a la Financiamiento

En Colombia, el acceso al financiamiento es uno de los aspectos más relevantes. Sin embargo, dada la necesidad del desarrollo del mercado de almacenamiento, se han buscado oportunidades fuera del país para fomentar la investigación en este campo. La UDSTA en asociación con Interconexión Eléctrica S.A (ISA), ha financiando desde el 2016, un estudio de factibilidad para evaluar el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala en Colombia, Brasil y México. El objetivo de dicho estudio es estudiar las oportunidades de almacenamiento de energía, realizar análisis de factibilidad y crear un plan de negocios para cada uno de los tres países, para finalmente implementar unidades de almacenamiento que mejoren la confiabilidad de la red y respalden la generación de nuevas energías renovables (Opportunities, n.d.).



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

## **6. Asociaciones Internacionales para la Investigación en Almacenamiento de Energía**

Bogotá  
Abril de 2018

## 6. Asociaciones Internacionales para la Investigación en Almacenamiento de Energía

Debido a la importancia del almacenamiento de energía para la seguridad energética mundial, se han creado grandes asociaciones americanas, europeas y en menor medida asiáticas, para la investigación, desarrollo y seguimiento del almacenamiento de energía. Las asociaciones más destacadas se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6.** Alianzas internacionales para la investigación y desarrollo del almacenamiento de energía

Asociación	Traducción	Sigla	Países Miembros	Misión y /o Visión
Energy Storage Association	Asociación de Almacenamiento de Energía	ESA	Estados Unidos	ESA defiende y adelanta la industria de almacenamiento de energía para alcanzar su objetivo de 35 GW en 2025, lo que resultaría en una red eléctrica más resistente, eficiente, sostenible y asequible.
Global Energy Storage Alliance	Alianza Global de Almacenamiento de Energía	GESA	Estados Unidos Alemania China India	En 2025 el almacenamiento de energía habrá hecho una contribución significativa y medible, para ayudar a lograr penetraciones mucho más altas de energía renovable y acceso a la electricidad para millones de personas en todo el mundo.
German Energy Storage Association	Asociación Alemana de Almacenamiento de Energía	BVES	Alemania	BVES representa los intereses de las empresas de los sectores más diversos, que tienen el objetivo común de desarrollo y comercialización, así como la operación de almacenamiento de energía en las áreas de electricidad, calor y movilidad.
California Energy Storage Alliance	Alianza de Almacenamiento de Energía de California	CESA	Estados Unidos	La misión de CESA es hacer del almacenamiento de energía un recurso energético principal que acelere la adopción de energía renovable y promueva un sistema de energía eléctrica más limpio, eficiente, asequible, confiable y seguro en California.
Energy Storage Canadá	Almacenamiento de Energía de Canadá	ESC	Canadá	ESC se enfoca en avanzar en oportunidades y construir el mercado para el almacenamiento de energía a través de la promoción, la creación de redes y la educación de las partes interesadas.
China Energy Storage Alliance	Alianza de Almacenamiento de Energía de China	CNESA	China	CNESA está enfocada en generar investigaciones de calidad sobre los proyectos, los jugadores y las políticas que dan forma a la industria. También en promover alianzas comerciales y gubernamentales que fortalezcan la industria de almacenamiento de energía en China y en el extranjero y de Gestionar proyectos de demostración para mostrar a los

China Energy Storage Alliance	Alianza de Almacenamiento de Energía de China	CNESA	China	CNESA está enfocada en generar investigaciones de calidad sobre los proyectos, los jugadores y las políticas que dan forma a la industria. También en promover alianzas comerciales y gubernamentales que fortalezcan la industria de almacenamiento de energía en China y en el extranjero y de Gestionar proyectos de demostración para mostrar a los responsables de las políticas cómo el almacenamiento de energía es la clave de la economía en transición de China.
India Energy Storage Alliance	Alianza de Almacenamiento de Energía de India	IESA	India	La visión de IESA es convertir a India en un líder mundial en almacenamiento de energía y microredes, y un centro para la fabricación de estas tecnologías emergentes para 2020, al facilitar la adopción de tecnología.

**Fuente:** Elaboración Propia basada en los sitios web de cada una de las asociaciones.





GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO COLOMBIANO

Informe de vigilancia tecnológica en  
dispositivos de almacenamiento de  
energía producida por fuentes de  
energía renovables no  
convencionales

## 5. Referencias Bibliográficas

Bogotá  
Abril de 2018

## 7. Referencias Bibliográficas

- Abbey, C., & Joos, G. (2007). Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(3), 769–776. <https://doi.org/10.1109/TIA.2007.895768>
- Berrada, A., Loudiyi, K., & Zorkani, I. (2016). Valuation of energy storage in energy and regulation markets. *Energy*, 115, 1109–1118. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.093>
- Buckles, W., & Ilassenzahl, W. V. (2000). Superconducting Magnetic Energy Storage. *IEEE Power Engineering Review*, 16–29. <https://doi.org/10.1109/39.841345>
- Eller, A., & Gauntlett, D. (2017). Energy storage trends and opportunities in emerging markets. *Energy Storage Trends and Opportunities in Emerging Markets*, 2009. Retrieved from <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/ed6f9f7f-f197-4915-8ab6-56b92d50865d/7151-IFC-EnergyStorage-report.pdf?MOD=AJPERES%0Ahttp://prism.talis.com/sussex-ac/items/1112426%5Cnhttp://suss.ebiblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=588991>
- Guerrero, M., Romero, E., Barrero, F., Milanés, M., & González, E. (2009). Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems. *Przegląd Elektrotechniczny Electrical Review*, Page (S), 188–195. Retrieved from <http://peandes.unex.es/archives/P126.pdf>
- ISA. (2017). Perspectivas para la incorporación del Almacenamiento de Energía en el SIN.
- Janson, N. (2014). Potential for Energy Storage in Combination with Renewable Energy in Latin America and the Potential for Energy Storage in Combination with Renewable Energy in Latin America and the Caribbean, (February). Retrieved from [https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6042/Energy Storage with Renewable Energy - updated Feb 2014 \(4\).pdf;jsessionid=264E7AFBE6C0898CBAEF01458553A0C0?sequence=1](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6042/Energy%20Storage%20with%20Renewable%20Energy%20-%20updated%20Feb%202014%20(4).pdf;jsessionid=264E7AFBE6C0898CBAEF01458553A0C0?sequence=1)
- Kyriakopoulos, G. L., & Arabatzis, G. (2016). Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1044–1067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.046>
- López Velasquez, J. F. (2014). Efecto del almacenamiento de energía en el mercado mayorista de Colombia. *Maestría Thesis*, 133. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/12079/>
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- OCDE & IEA. (2017). Market Report Series: Renewables 2017, analysis and forecats to 2022. *Journal for Quality Participation*, 104(42), 20142–20142. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603395103>
- Opportunities, G. I. (n.d.). USTDA in Colombia USTDA in Colombia.
- Restricciones, M., & Energía, M. (2015). Almacenamiento de Energía : Agosto 2015 Jornadas Técnicas - XM.



Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359–367. <https://doi.org/10.1038/35104644>

Xie, H., & Chen, H. (2017). Application of Energy Storage in High Penetration Renewable Energy System, 188–193.

Zhou, X., Tang, Y., Shi, J., Zhang, C., Gong, K., & Zhang, L. (2018). Cost Estimation Models of MJ Class HTS Superconducting Magnetic Energy Storage Magnets. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 8223(1), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2821363>