



**OPORTUNIDADES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ULTRACAPACITORES EN
APLICACIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO
COLOMBIANO**

**REALIZADO POR:
CARLOS ANDRÉS ÁLVAREZ**

TRABAJO DE GRADO

**DIRECTOR:
ANDRÉS EMIRO DIEZ
PH.D. EN INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**MEDELLÍN
FEBRERO DE 2016**

Tabla de Contenido

1. MARCO CONCEPTUAL	6
1.1 Ventajas y desventajas de los ultracapacitores	7
1.1 Tecnologías de los ultracapacitores	8
1.1.1 Capacitores de doble capa (carbón/carbón).....	9
1.1.2 Pseudo-capacitores	9
1.1.3 Capacitores híbridos (asimétricos).....	9
2. VIGILANCIA TECNOLÓGICA.....	10
2.1. Metodología	10
2.2. Países líderes	11
2.3. Densidad de publicaciones en el mundo	12
2.4. Redes de cooperación entre países	13
2.5. Dinámica de publicaciones científicas por países	15
2.6. Dinámica de publicaciones científicas.....	16
2.7. Curva en S de la tecnología	17
2.8. Autores líderes	18
2.9. Red de cooperación de los principales autores	19
2.10. Instituciones líderes	21
2.11. Red de cooperación de instituciones	23
2.12. Artículos con mayor número de citas.....	25
2.13. Principales journals	26
3. CASOS DE ESTUDIO	27
4. PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS ULTRACAPACITORES	34
4.1. Dispositivos electrónicos.....	37
4.2. Transporte	38
4.3. Equipos para la medicina	38
5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS ULTRACAPACITORES	42
6. DIAGNÓSTICO DE LA REGULACIÓN PARA ULTRACAPACITORES EN COLOMBIA	51
- Ley 697 de 2001	51
- Ley 788 de 2002	51

- Resolución 180609 de 2006 Ministerio de Minas y Energía	52
- Ley 1450 de 2011	52
- Ley 1665 de 2013	52
- Proyecto de Resolución 004 de 2014 CREG	52
- Ley 1715 de 2014	53
7. VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES	53
7.1. Metodología	53
7.2. Resultados	54
7.2.1. Características de participación	54
7.2.2. Procedencia geográfica	55
7.2.3. Nivel de conocimiento.....	56
7.2.4. Nivel de conocimiento de Colombia	56
7.2.5. Nivel de implementación	58
7.2.6. Escala temporal	59
7.3. Análisis de temáticas.....	60
7.3.1. Estrategias regulatorias, financieras y ambientales.....	61
7.3.2. Consideraciones técnicas	62
7.3.3. Consideraciones económicas	64
7.4. Opiniones de expertos	65
8. LÍNEAS DE ACCIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES	66
9. EVALUACIÓN DE COSTOS DE LAS APLICACIONES DE LOS ULTRACAPACITORES	69
10. CONCLUSIONES	76
11. BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXO 1: ESTRUCTURA ENCUESTA.....	81

Lista de figuras

Figura 1. Diseño interno de los ultracapacitores	6
Figura 2. Diseño externo de un ultracapacitor cilíndrico	7
Figura 3. Países líderes en publicaciones científicas	12
Figura 4. Densidad de publicaciones en el mundo.....	13
Figura 5. Red de cooperación de Estados Unidos	14
Figura 6. Red de cooperación de China.....	14
Figura 7. Red de cooperación de Francia	15
Figura 8. Dinámica de publicaciones por países	16
Figura 9. Dinámica de publicaciones científicas.....	17
Figura 10. Curva en S.....	18
Figura 11. Autores líderes	19
Figura 12. Red de cooperación de Thounthong, P.....	20
Figura 13. Red de cooperación de Davat, B.	20
Figura 14. Red de cooperación Miller, J. M.....	21
Figura 15. Instituciones líderes	22
Figura 16. Red de cooperación de Maxwell Technologies.....	23
Figura 17. Red de cooperación de Kingmongkut's Institute of Technology North Bangkok	24
Figura 18. Red de cooperación de Chinese Academy of Sciences	24
Figura 19. Principales journals	26
Figura 20. Sitras SES, Portland.....	27
Figura 21. Sistema MES, fabricado por Siemens.....	27
Figura 22. Sitras HES, Lisboa.....	28
Figura 23. Micro – Red de con almacenamiento de energía Palmdale, California.	28
Figura 24. Ultracapacitores de 28 kW ubicado en la Universidad de California	29
Figura 25. Sistema de almacenamiento para los trenes SEPTA.	29
Figura 26. Proyecto La Palma, Islas Canarias, España.	30
Figura 27. FerroSmartGrid Sector Ferroviario Málaga, España	31
Figura 28. Ferrolinera, sistema de almacenamiento híbrido (Baterías y Ultracapacitores)	32
Figura 29. Sistema de almacenamiento del metro de Seúl.....	33
Figura 30. Puerto de aguas profundas Yangshan.....	33
Figura 31. Metro de Medellín	34
Figura 32. Aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía.	34
Figura 33. Sistema de recuperación de energía en el momento de frenado del tren	35
Figura 34. Aceleración con la fuente de almacenamiento adicional	36
Figura 35. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sistema eléctrico de potencia	37
Figura 36. Distribución de características de participación	55
Figura 37. Distribución de procedencia geográfica de expertos.....	55
Figura 38. Nivel de conocimiento en almacenamiento de energía de los expertos encuestados....	56
Figura 39. Conocimiento en Colombia frente a las aplicaciones de los ultracapacitores.....	57

Figura 40. Nivel de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores 58

Figura 41. Horizonte temporal de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores 60

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación entre ultracapacitor, capacitor convencional y baterías.	8
Tabla 2. Características de los ultracapacitores de diferentes empresas.....	8
Tabla 3. Tecnologías para el desarrollo de mayor densidad energética.....	9
Tabla 4. Ecuaciones de búsqueda	10
Tabla 5. Artículos con mayor número de citas.....	25
Tabla 6. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sector consumidor.....	40
Tabla 7. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sector industrial.....	41
Tabla 8. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sector automotriz.....	41
Tabla 9. Especificaciones técnicas de los ultracapacitores	43
Tabla 10. Pesos ponderados de nivel de conocimiento.....	57
Tabla 11. Pesos ponderados del nivel de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores	59
Tabla 12. Pesos ponderados del horizonte temporal de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores	60
Tabla 13. Pesos ponderados de las estrategias para la implementación de las aplicaciones	62
Tabla 14. Pesos ponderados de las consideraciones técnicas de las aplicaciones de los ultracapacitores	62
Tabla 15. Pesos ponderados de los aspectos económicos.....	64
Tabla 16. Líneas de acción para la implementación de los ultracapacitores.....	66
Tabla 17. Costos asociados a los dispositivos electrónicos portables	69
Tabla 18. Costos asociados a los equipos para la medicina	70
Tabla 19. Costos asociados a los autobuses de servicio público.....	70
Tabla 20. Costos asociados a los camiones de carga pesada.....	71
Tabla 21. Costos asociados a los trenes y tranvías.....	71
Tabla 22. Costos asociados a los elevadores y grúas	71
Tabla 23. Costos asociados a los sistemas de reserva de energía y UPS	72
Tabla 24. Costos asociados al soporte de generación de energía convencional	72
Tabla 25. Costos asociados al soporte a las energías renovables	73
Tabla 26. Costos asociados a los vehículos eléctricos e híbridos.....	74
Tabla 27. Costos de implementación de un sistema de ultracapacitores en el Metro de Medellín	74

1. MARCO CONCEPTUAL

Los sistemas eléctricos más comunes de almacenamiento de energía son las baterías y los capacitores. Los capacitores almacenan energía por medio de la separación de carga, almacenando esta energía en una capa delgada de material dieléctrico que es soportado por un metal que actúa como terminal conductor para el dispositivo. La energía almacenada en un capacitor está dada por $\frac{1}{2}CV^2$; donde C es la capacitancia en faradios y V es el voltaje entre los terminales.

En una batería la energía es almacenada en forma de reacciones químicas en los electrodos. La energía eléctrica es liberada a través de una carga conectada a los terminales de la batería. La energía almacenada en una batería está dada por VQ ; donde V es el voltaje de la célula y Q es la carga eléctrica transferida a la carga durante la reacción química.

Por su parte un ultracapacitor, denominado muchas veces como supercapacitor, capacitor de doble capa o capacitor electroquímico de doble capa, es un dispositivo de almacenamiento de energía el cual está compuesto por dos electrodos separados por un material aislante e inmerso en un electrolito. La carga es almacenada en la interfaz entre el electrodo y el electrolito (Burke, 2000).

Hoy en día, la mayoría de ultracapacitores son fabricados utilizando la forma cilíndrica, sin embargo, el mercado aún se encuentran muchos productos que utilizan la forma prismática (Tecate Group, 2010). La Figura 1 muestra la construcción interna de un ultracapacitor, donde se identifica los electrodos, el separados aislante y el electrolito. Por su parte en la Figura 2 se puede observar las partes constitutivas de un ultracapacitor pero externamente.

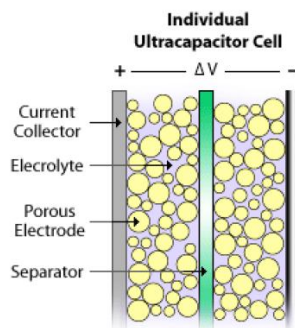


Figura 1. Diseño interno de los ultracapacitores
Fuente: Tecate Group. (2010). What is an Ultracapacitor?

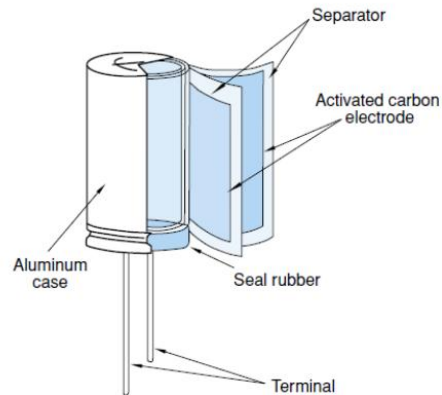


Figura 2. Diseño externo de un ultracapacitor cilíndrico
Fuente: Tecate Group. (2010). What is an Ultracapacitor?

1.1 Ventajas y desventajas de los ultracapacitores

Ventajas

El uso de ultracapacitores supone ventajas técnicas, económicas y medioambientales, algunas de estas ventajas se muestran a continuación (Tenorio Chango & Vallejo Aguirre, 2010).

- Los ciclos de carga y descarga de los ultracapacitores pueden ser mayor a 500.000 ciclos sin perder rendimiento, en cambio las baterías solo funcionan correctamente hasta cierta cantidad, aproximadamente 1.000 ciclos.
- Los periodos de carga y descarga de los ultracapacitores son muy rápidos, a comparación de las baterías, que al funcionar por medio de reacciones electroquímicas necesitan de mayor cantidad de tiempo.
- Los ultracapacitores pueden ser fabricados en diferentes medidas y tamaños, por lo que los hace una tecnología muy flexible.
- Posee una alta eficiencia, superior al 95% (Miller & Simon, 2008).

Desventajas

- La densidad de energía de los ultracapacitores es menor a las baterías, aproximadamente almacenan una quinta o una décima parte de lo que almacena una batería.
- Funcionan a bajos voltajes, un voltaje típico es 2,5 voltios; por lo tanto para aplicaciones donde requieran voltajes superiores se deben realizar arreglos en serie, y un arreglo mayor a 3 ultracapacitores requiere balancear el voltaje.
- Posee una autodescarga considerablemente mayor. Pueden perder la mitad de la carga en aproximadamente un mes.

Muchas personas comparan los dispositivos de almacenamiento de energía con los ultracapacitores, cada dispositivo tiene sus propias ventajas y desventajas (Tecate Group, 2010), a continuación la Tabla 1 muestra algunas características de tres sistemas de almacenamiento.

Tabla 1. Comparación entre ultracapacitor, capacitor convencional y baterías.
Fuente: Tecate Group. (2010). What is an Ultracapacitor?

ITEM	Batería de ácido de plomo	Ultracapacitor	Capacitor convencional
Tiempo de carga	1 a 5 horas	0,3 a 3 seg	10^{-3} a 10^{-6} seg
Tiempo de descarga	0,3 a 3 horas	0,3 a 3 seg	10^{-3} a 10^{-6} seg
Energía (Wh/kg)	10 a 100	1 a 10	< 0,1
Ciclo de vida	1.000	> 500.000	> 500.000
Potencia específica (W/kg)	< 1.000	< 10.000	< 100.000
Eficiencia	0,7 a 0,85	0,85 a 0,98	> 0,95
Temperatura de operación (°C)	-20 a 100	-40 a 65	-20 a 65

Los ultracapacitores de varios fabricantes fueron sometidos a pruebas por UC Davis (Burke, 2010). El resumen de los resultados de estas pruebas se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los ultracapacitores de diferentes empresas
Fuente: Burke, A. (2010). Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. International.

Device	V rated	C (F)	R (mOhm)	RC (sec)	Wh/kg
Maxwell	2,7	2885	0,375	1,08	4,2
ApowerCap	2,7	55	4	0,22	5,5
Ness	2,7	1800	0,55	1	3,6
Asahi Glass	2,7	1375	2,5	3,4	4,9
Panasonic	2,5	1200	1	1,2	2,3
EPCOS	2,7	3400	0,45	1,5	4,3
LS Cable	2,8	3200	0,25	0,8	3,7
BatScap	2,7	2680	0,2	0,54	4,2
Power Sys	2,7	1350	1,5	2	4,9
Fuji Heavy Industry hybrid	3,8	1800	1,5	2,6	9,2
JSR Micro	3,8	1000	4	4	11,2
		2000	1,9	3,8	12,1

1.1 Tecnologías de los ultracapacitores

Existe un gran número de enfoques para desarrollar ultracapacitores cada vez con una mayor densidad energética y mayor potencia, cambiando el número de celdas, el material de los electrodos y el mecanismo de almacenamiento de energía (Burke, 2010).

1.1.1 Capacitores de doble capa (carbón/carbón)

La mayoría de los capacitores electroquímicos que actualmente se encuentran en el mercado son denominados eléctricos de doble capa (EDLC, por sus siglas en inglés). El almacenamiento de energía en condensadores de doble capa es resultado de la separación de carga en capas microscópicamente finas formadas entre un sólido, la superficie y un electrolito líquido que contiene iones. El material del electrodo dominante es microporoso, carbón activado.

1.1.2 Pseudo-capacitores

En un condensador de doble capa (EDLC), los iones activos en el electrolito no se transfieren sobre la superficie del electrodo sólido. Si los iones de la doble capa se transfieren a la superficie y se combinan con los átomos en la superficie, el mecanismo se denomina "pseudo-capacitancia". Las reacciones redox son buenos ejemplos de este proceso y los óxidos metálicos son buenos candidatos para el uso en los electrodos de dispositivos pseudo capacitivos. La capacitancia específica de los materiales electrodos utilizados en los pseudo-capacitores son significativamente más altos que los utilizados en los de carbón microporosos.

1.1.3 Capacitores híbridos (asimétricos)

Esta categoría de condensadores electroquímicos se refiere a dispositivos en los que uno de los electrodos es carbono microporoso y el otro electrodo utiliza ya sea un material de pseudo capacitancia o un material de Faraday como el utilizado en una batería. Estos dispositivos se conocen como condensadores híbridos asimétricos.

La Tabla 3 presenta diferentes tecnologías de ultracapacitores que se han enfocado en mejorar la densidad de energía y la potencia, mediante el cambio de los materiales del electrodo, el mecanismo de almacenamiento de energía y las celdas de voltaje.

Tabla 3. Tecnologías para el desarrollo de mayor densidad energética
Fuente: Burke, A. (2010). Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. International.

Tipo de tecnología	Material del electrodo	Mecanismo de almacenamiento de energía	Celdas de voltaje	Densidad de energía (Wh/kg)	Densidad de potencia (kW/kg)
Eléctrico de doble capa	Carbón activado	Separación de cargas	2,5-3	5-7	1-3
Carbón avanzado	Carbón de grafito	Transferencia de cargas	3-3,5	8-12	1-2
Carbón avanzado	Nanotubos	Separación de cargas	2,5-3	No se conoce	No se conoce
Pseudo-capacitores	Óxido de metal	Transferencia de carga Redox	2-3,5	10-15	1-2
Híbrido	Óxido de carbón/metal	Transferencia de cargas	2-3,3	10-15	1-2
Híbrido	Óxido de carbón/plomo	Doble capa/faraday	1,5-2,2	10-12	1-2

2. VIGILANCIA TECNOLÓGICA

Con la finalidad de obtener un referenciamiento internacional de la tecnología de almacenamiento de energía denominada ultracapacitor y las aplicaciones en las cuales es más recomendable su uso, es indispensable conocer cómo se encuentra la temática en el mundo, para esto es necesario hacer un reconocimiento de aquellos países que lideran o que son referentes en la publicación de artículos científicos, además de observar sus investigaciones, dinámica de publicaciones y las principales instituciones que se dedican a estudiar dichos temas.

2.1. Metodología

Para la elaboración de la vigilancia tecnológica, se procedió a buscar información relevante sobre los ultracapacitores y temas relacionados mediante diferentes ecuaciones de búsqueda que abarcaran la temática en un ámbito general y a partir de la fecha de publicación del primer artículo (sin filtro de fecha). Para ello se buscó y exportó información de la base de datos de referenciación de artículos científicos Scopus, los días 02 y 03 de mayo de 2015, para luego ser depurada y analizada mediante el software de minería de datos, Vantage Point.

La Tabla 4 muestra las ecuaciones de búsqueda utilizadas para realizar la indagación científica de los ultracapacitores. Se observa que las palabras clave de la primera columna se mezclaron con las palabras clave de la segunda columna para luego obtener una ecuación de búsqueda general. Se presentan los resultados encontrados con cada ecuación de búsqueda y el número de artículos seleccionados, estos artículos seleccionados fueron los que resultaron de mayor relevancia al realizar una primera revisión en la base de datos de Scopus.

Tabla 4. Ecuaciones de búsqueda
Fuente: Elaboración propia

Palabras Claves		Ecuaciones de Búsqueda	Resultados encontrados	Número de artículos seleccionados
Ultracapacitor		Ultracapacitor	559	177
Supercapacitor		Supercapacitor	1232	167
Ultracapacitor	Energy Storage System	Ultracapacitor Energy Storage System	275	108
Supercapacitor	Energy Storage System	Supercapacitor Energy Storage System	536	129
Ultracapacitor	Technology	Ultracapacitor Technology	111	48
Supercapacitor	Technology	Supercapacitor Technology	175	36
Ultracapacitor	Smart grid	Ultracapacitor Smart grid	9	6
Supercapacitor	Smart grid	Supercapacitor Smart grid	17	6
Ultracapacitor	Renewable energy resources	Ultracapacitor Renewable energy resources	23	6
Supercapacitor	Renewable energy resources	Supercapacitor Renewable energy resources	66	19

Palabras Claves		Ecuaciones de Búsqueda	Resultados encontrados	Número de artículos seleccionados
Ultracapacitor	Energy generation system	Ultracapacitor Energy generation system	51	22
Supercapacitor	Energy generation system	Supercapacitor Energy generation system	125	42
Ultracapacitor	Electric vehicle	Ultracapacitor Electric vehicle	304	104
Supercapacitor	Electric vehicle	Supercapacitor Electric vehicle	251	73
Ultracapacitor	Application	Ultracapacitor Application	210	38
Supercapacitor	Application	Supercapacitor Application	452	27
Ultracapacitor	Hybrid energy storage	Ultracapacitor Hybrid energy storage	200	26
Supercapacitor	Hybrid energy storage	Supercapacitor Hybrid energy storage	255	38
Ultracapacitor	Energy efficiency	Ultracapacitor Energy efficiency	127	19
Supercapacitor	Energy efficiency	Supercapacitor Energy efficiency	209	36
Ultracapacitor	Distributed generation	Ultracapacitor Distributed generation	18	5
Supercapacitor	Distributed generation	Supercapacitor Distributed generation	43	8
Ultracapacitor	Elevator System	Ultracapacitor Elevator System	4	7
Supercapacitor	Elevator System	Supercapacitor Elevator System	12	4
Ultracapacitor	powertrains	Ultracapacitor powertrains	16	7
Supercapacitor	powertrains	Supercapacitor powertrains	14	4
Total			5294	1162

2.2. Países líderes

En la Figura 3, se observan los países líderes en cuanto a publicaciones científicas, la búsqueda arrojó un total de 55 país con por lo menos una publicación, para efectos del análisis se tomaron los 15 países con mayor número de publicaciones y se adicionaron los países latinoamericanos. Estados Unidos presenta un liderazgo en la publicación de artículos científicos respecto a los demás territorios, ya que tiene una participación de un 23,7%, correspondiente a 126 publicaciones científicas de un total de 531 recopiladas de los 19 países mostrados en la figura. Luego se encuentra la China con una participación del 16,8% y en tercer lugar sigue Francia, aportando el 13,4% de las publicaciones. Entre los tres países suman un 53,9%, concluyendo que el interés en la temática trabajada se centra principalmente en estas tres naciones, ya que cuentan con un poco más de la mitad de las publicaciones científicas referentes a los sistemas de almacenamiento de energía denominado ultracapacitores; luego vienen países como Reino

Unidos, Italia, India, entre otros, extendiéndose en los últimos años el interés respecto a la temática en todo el mundo.

Por su parte Brasil es el país latinoamericano líder en la publicación de artículos científicos relacionados con ultracapacitores, contando con seis (6) divulgaciones. Los países latinoamericanos en su conjunto suman un porcentaje de 2,8%, evidenciando la poca participación de esta región en comparación con el resto del mundo.

Países Líderes

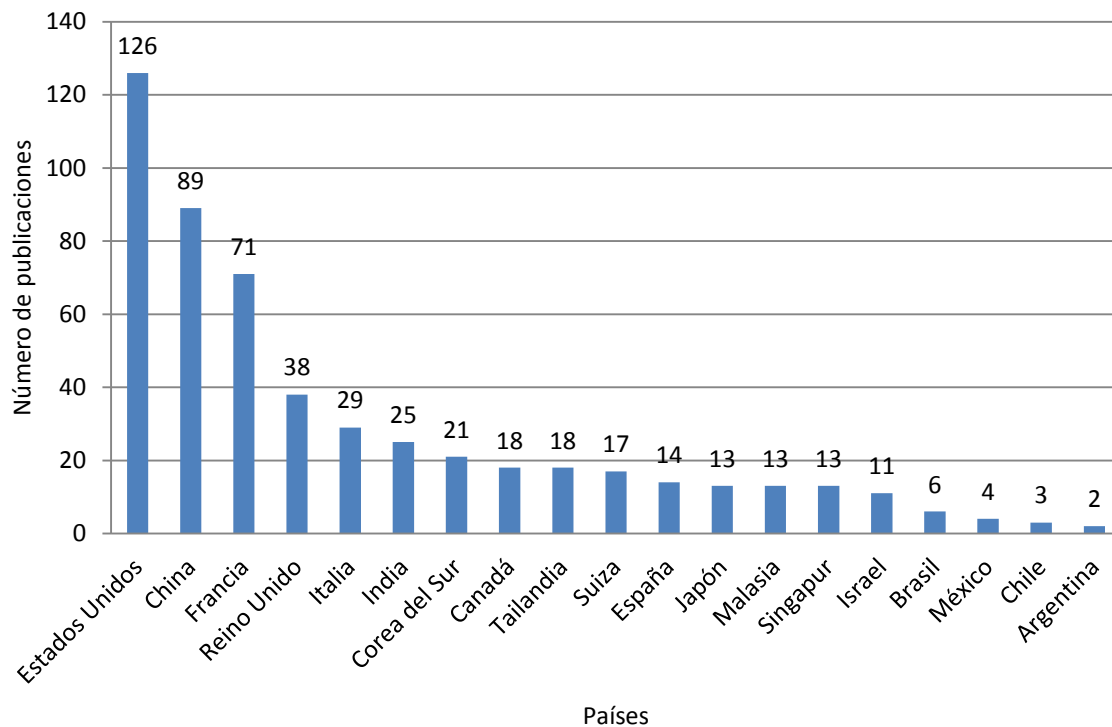


Figura 3. Países líderes en publicaciones científicas
Fuente: Elaboración propia

2.3. Densidad de publicaciones en el mundo

En el atlas del mundo se puede observar los países que han realizado divulgaciones sobre el tema. Es de resaltar que en todos los continentes hay países que han hecho investigaciones, aunque regiones como África no se han interesado en el tema objeto de estudio; esto lleva a concluir que la temática es un tema de interés global, liderado por países como Estados Unidos y China.

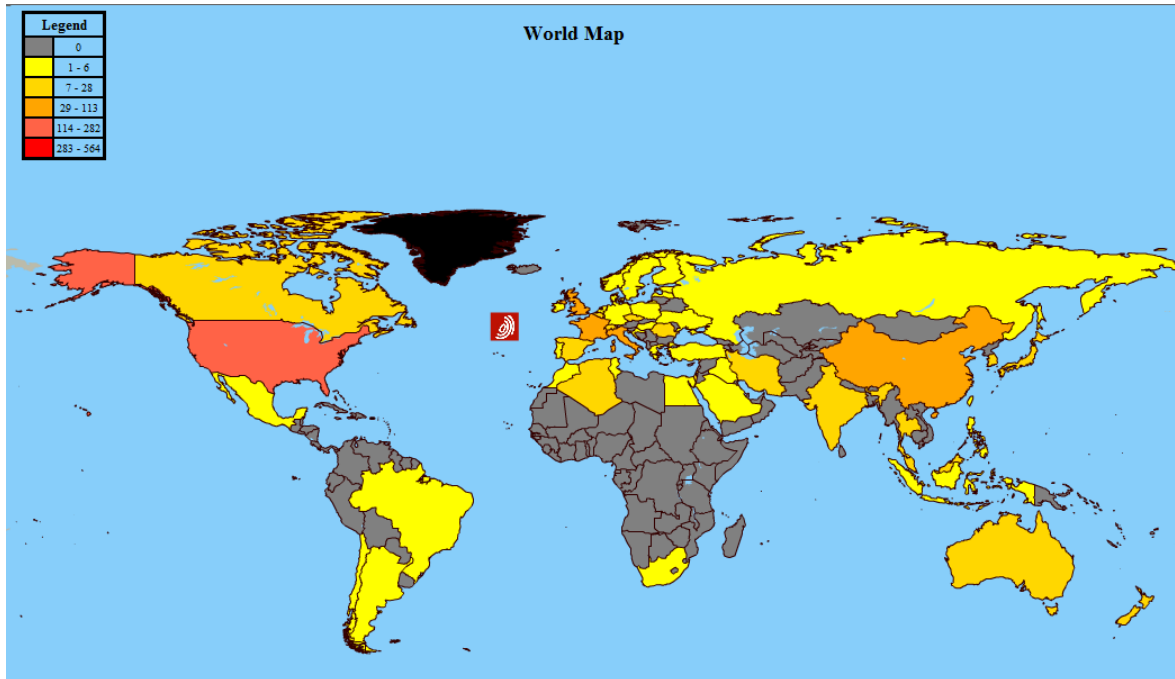


Figura 4. Densidad de publicaciones en el mundo
Fuente: Elaboración propia

2.4. Redes de cooperación entre países

En el proceso de elaboración de artículos, se encuentra la existencia de asociaciones entre diferentes países. Como el tema del almacenamiento de energía a través de ultracapacitores, es una problemática acogida a nivel mundial, es previsible que exista cooperación entre países para el desarrollo de investigaciones.

En la Figura 5, se puede observar la red de cooperación de Estados Unidos; la cual se compone de quince países que trabajan en conjunto en la elaboración de artículos científicos. Su mayor participación vinculada a otro país se presenta con Canadá y China, en donde se contienen cinco artículos publicados en conjunto con ambos países. Sin embargo el mayor número de publicaciones se realiza de manera individual, evidenciando la poca participación con otras naciones.

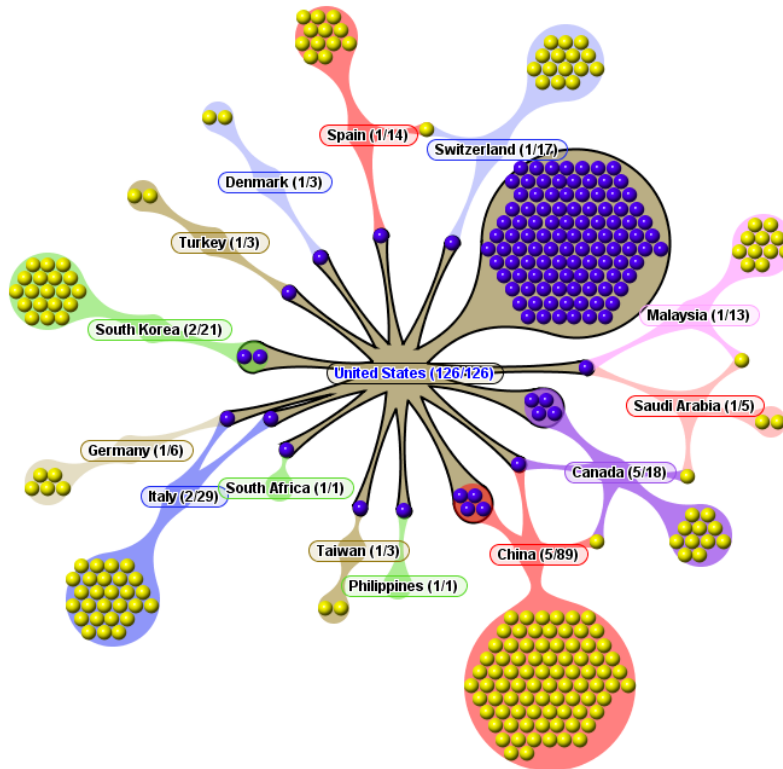


Figura 5. Red de cooperación de Estados Unidos
Fuente: Elaboración propia

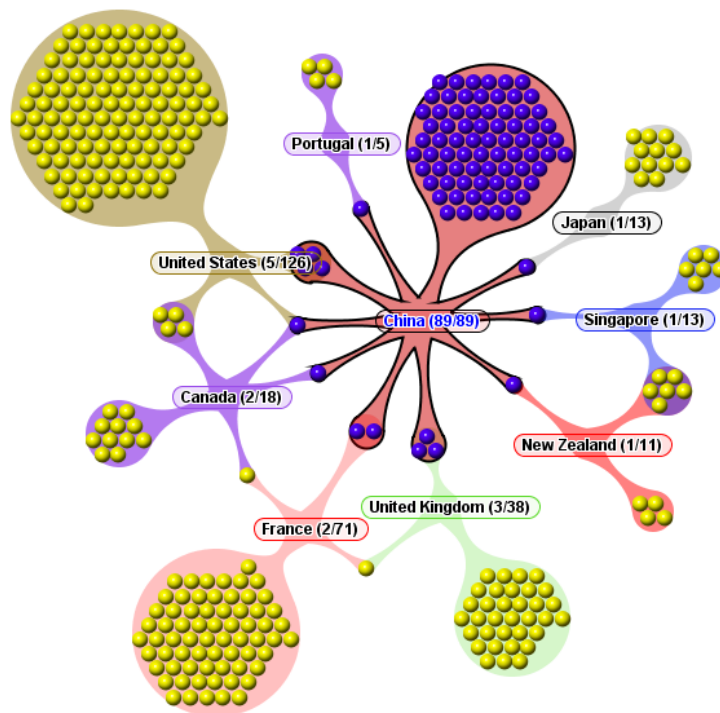


Figura 6. Red de cooperación de China
Fuente: Elaboración propia

La red de cooperación de China está compuesta por nueve países, el número de artículos que posee cada uno y los artículos que comparten con China se evidencia en la Figura 6. Se puede observar que la mayor cantidad de publicaciones ha sido de manera individual, compartiendo en conjunto con Estados Unidos cinco artículos y con Reino Unido tres de los 89 que posee.

Siendo Francia el tercer país líder en publicación de artículos, su red está compuesta por 14 países. Su participación en colectivo con otros países es más significativa en comparación con los dos anteriores países líderes, con 17 publicaciones en conjunto con Tailandia y 10 con Suiza. Sin embargo, la tendencia sigue siendo en gran mayoría a trabajar de manera individual.

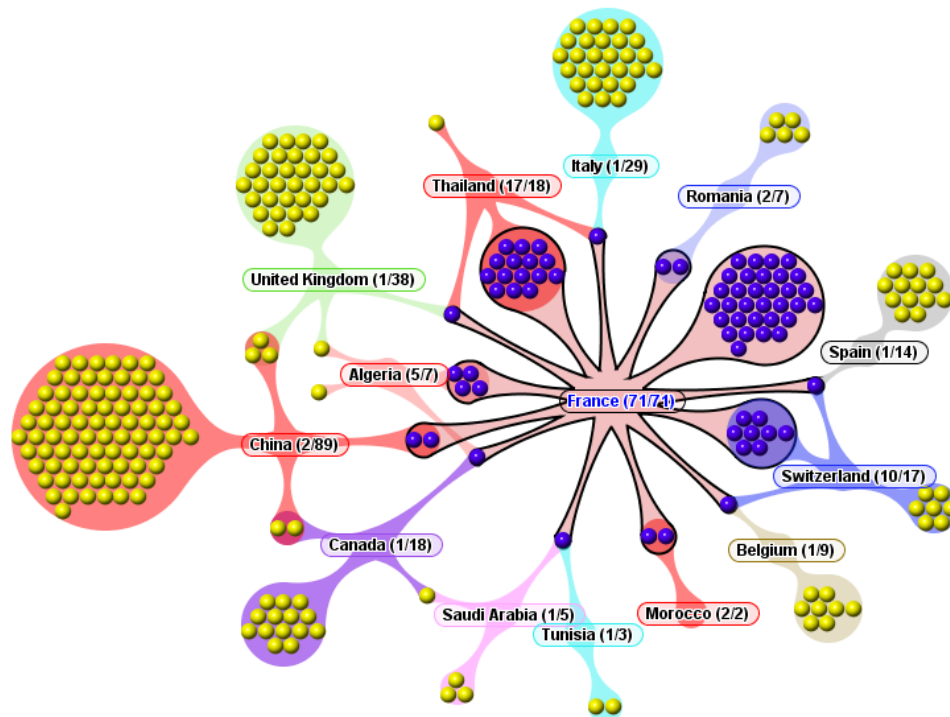


Figura 7. Red de cooperación de Francia
Fuente: Elaboración propia

2.5. Dinámica de publicaciones científicas por países

La Figura 8 presenta la dinámica de publicaciones de los países más representativos en cuanto a artículos científicos; donde el eje de la izquierda representa los países y el eje superior los años. Se tiene evidencia de publicaciones desde el año 1991 por parte de Estados Unidos y Japón donde empezaron a interesarse en la temática, en dicho año se divulgaron los primeros artículos científicos, en los años posteriores se realizaron esporádicamente publicaciones.

Estados Unidos, país líder en publicaciones, realizó su primera publicación en el año 1991, y tuvo un creciente interés en los artículos científicos a partir del año 2004, debido a que el número de publicaciones indexadas aumentó considerablemente respecto a los años anteriores, con ocho publicaciones realizadas en dicho año. Para el caso de China se tiene que a partir del año 2007 los

artículos indexados tuvieron un crecimiento más significativo respecto a la tendencia que llevaba años atrás, con siete publicaciones, llegando a su punto más alto en el 2014 donde publicó 18 artículos.

Brasil es el país latinoamericano que se ha interesado más en la temática, su primeras dos publicaciones tuvieron lugar en el año 2009, luego en el año 2011 realizó un artículo y sus últimas publicaciones se llevaron a cabo en el 2014.

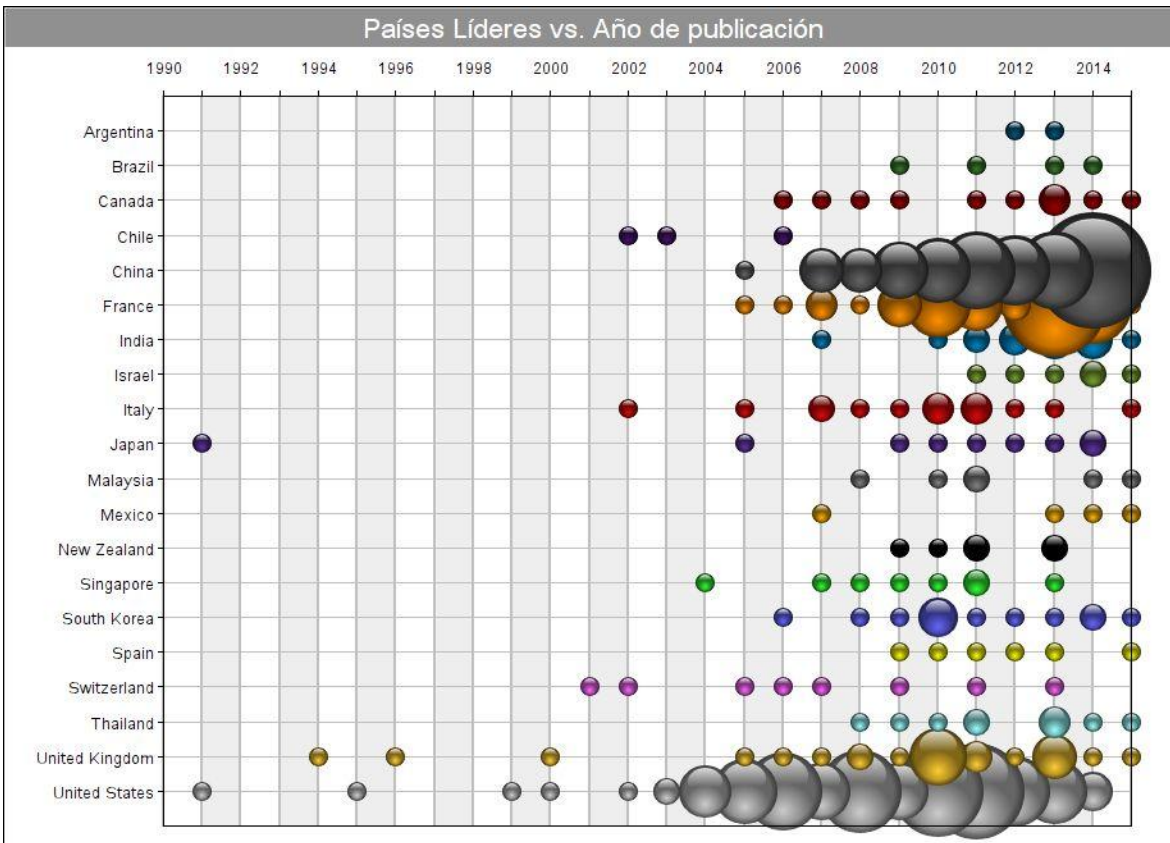


Figura 8. Dinámica de publicaciones por países¹
Fuente: Elaboración propia

2.6. Dinámica de publicaciones científicas

A continuación se presenta la distribución de publicaciones científicas en el tiempo, Figura 9. La figura fue realizada con una muestra de 564 artículos divulgados, resultantes del proceso de depuración de la información. A diferencia de la Figura 8, donde se muestran las publicaciones en el tiempo por países, la presente figura contiene todas las publicaciones encontradas en el tema, independientemente del país.

La primeras publicaciones científicas en la temática fueron realizadas en el año de 1991 en Estados Unidos con el siguiente artículo titulado "Application of ultracapacitors in electric vehicle

¹ La burbuja más grande equivale a 18 artículos (Año 2014 China) y la más pequeña equivale a 1 artículo.

propulsion systems” y en Japón con el artículo “Electric double layer capacitor. FM series supercapacitor”, luego en el año 1992 se presentó la tercera publicación, denominada “Ultracapacitor technology for electric vehicles”. Estas primeras divulgaciones evidencian el interés por el almacenamiento de energía enfocado en los vehículos eléctricos.

En los siguientes años a las primeras publicaciones científicas se registra muy poca participación, publicando esporádicamente año tras año. En el año 2004 se evidenció un crecimiento, con 11 artículos publicados, luego en el año 2005 se presenta una tendencia a realizar investigaciones en la temática, donde se realizaron 23 publicaciones, equivalentes a un 4,08%. En el siguiente año se presentó una disminución en las publicaciones, pero a partir de este año se muestra el comienzo de un real interés y de ahí a la fecha las publicaciones han mostrado un crecimiento significativo, aunque en algunos años se presentan disminuciones en el interés a publicar, lo que demuestra que la temática aún se encuentra en estudio y falta tiempo para que llegue a su grado de madurez.

Dinámica de publicaciones científicas

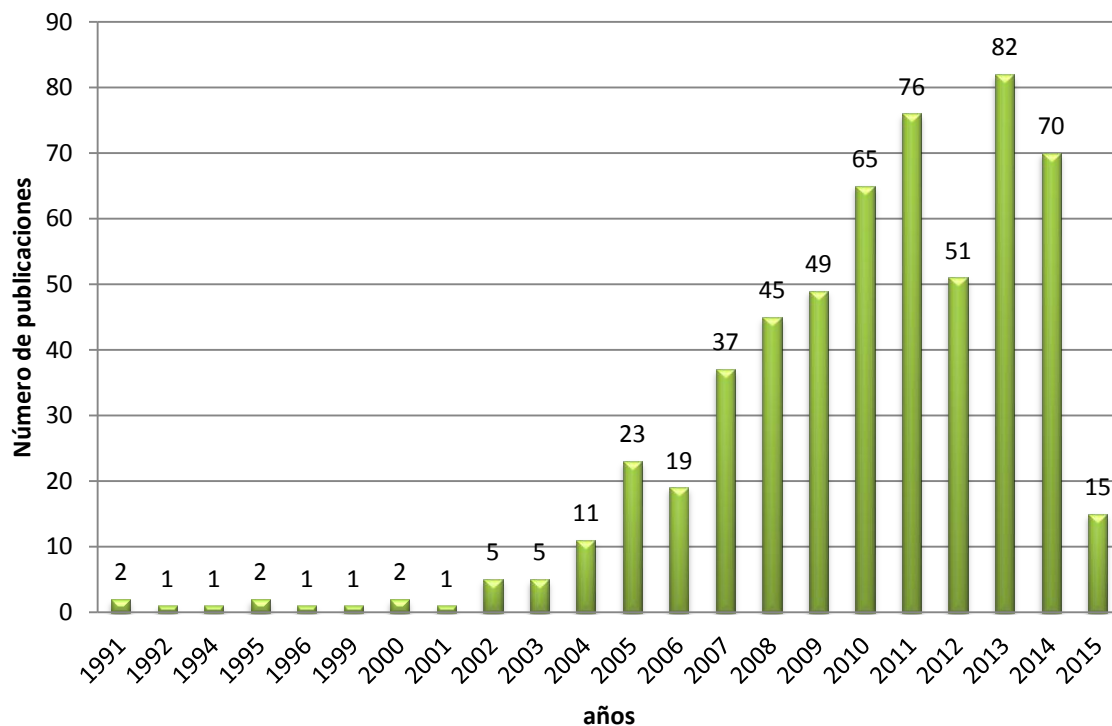


Figura 9. Dinámica de publicaciones científicas
Fuente: Elaboración propia

2.7. Curva en S de la tecnología

La curva en S del sistema de almacenamiento enfocado en ultracapacitores se presenta en la Figura 10, en la cual se percibe un crecimiento prolongado desde 1991, año donde ocurrió la

primera publicación científica. Se observa en la curva que la temática objeto de estudio aún se encuentra en su etapa de desarrollo y no se tiene claro cuándo llegará a su etapa de madurez.

CURVA en S

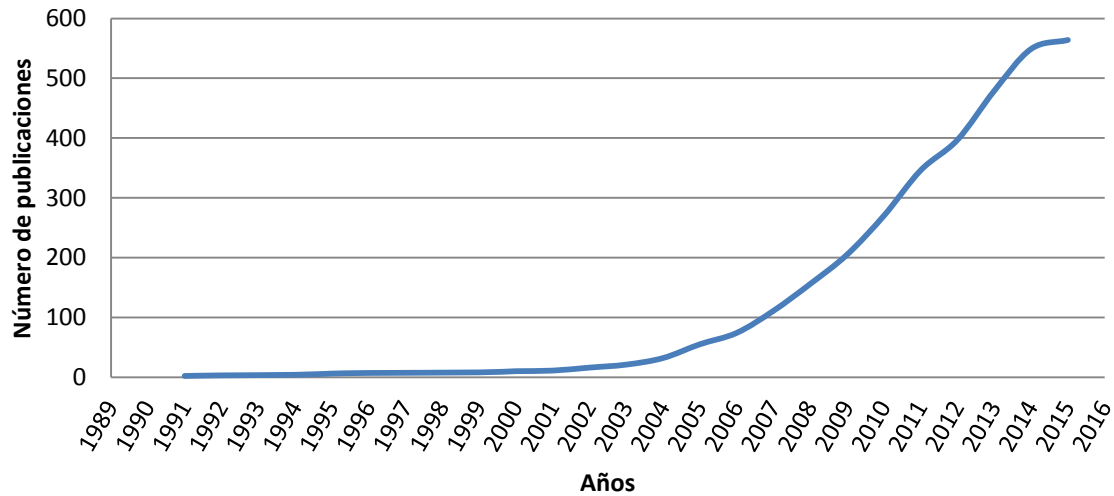


Figura 10. Curva en S
Fuente: Elaboración propia

2.8. Autores líderes

La Figura 11 presenta los autores referentes o aquellos que han publicado más artículos respecto al tema objeto del estudio. De una muestra de un total de 1.265 autores que al menos han participado en una publicación se tomaron sólo los 15 autores más representativos que poseían siete o más publicaciones indexadas.

El principal autor mostrado en la figura es Thounthong, P., el cual contiene 18 publicaciones indexadas y la totalidad de los artículos han sido divulgados con King Mongkut's University of Technology North Bangkok, radicado en Tailandia.

Por su parte, el segundo autor principal es Davat, B., posee 17 publicaciones; y al igual que Thounthong las publicaciones han sido realizadas con King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

Y en tercer lugar, se encuentra Miller, J. M., el cual contiene 15 publicaciones científicas en ultracapacitores; en su mayoría sus publicaciones están asociadas con la entidad líder en divulgaciones científicas Maxwell Technologies Inc.

Autores Líderes

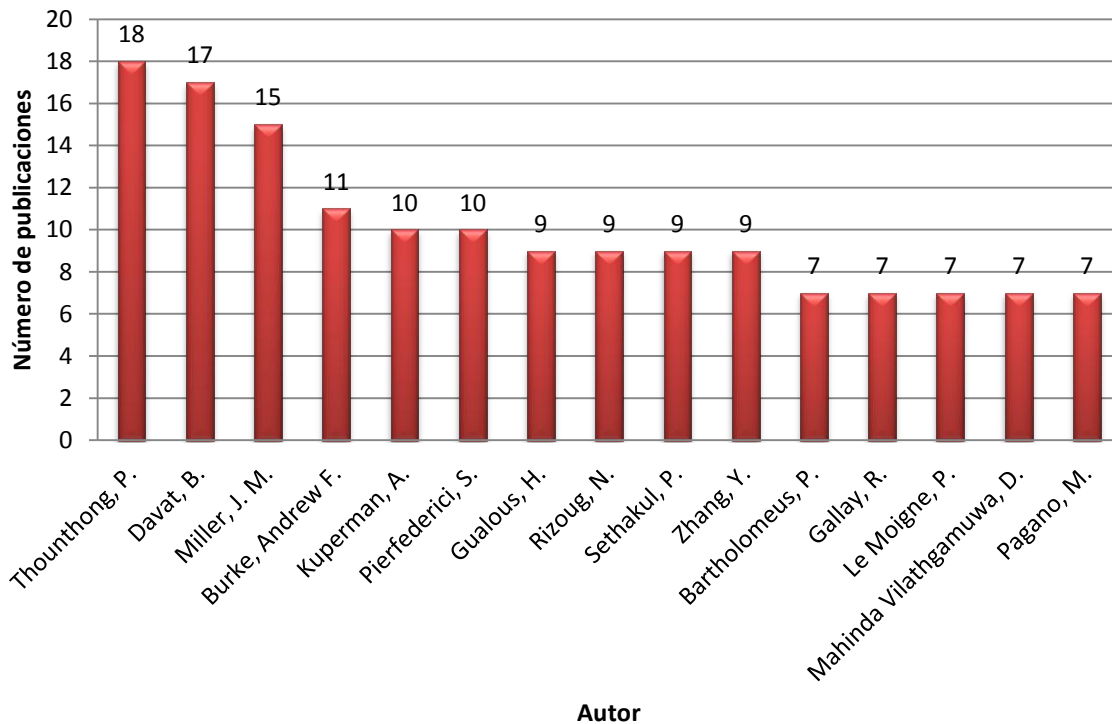


Figura 11. Autores líderes
Fuente: Elaboración propia

2.9. Red de cooperación de los principales autores

A continuación se presentan las redes de cooperación de los tres principales autores que se han dedicado a trabajar en los sistemas de almacenamiento enfocados en ultracapacitores. Las redes de cooperación se realizaron con una muestra de los primeros 100 autores más representativos en la publicación de artículos científicos. Estas redes evidencian la participación en conjunto de los autores líderes.

La Figura 12 presenta los autores que han trabajado en conjunto con Thounthong, P. el cuál es uno de los autores líderes en cuanto a publicación de artículos, con un total de 18 publicaciones. Esta red está compuesta por 14 autores, mostrando mayor interés a trabajar con Davat, B., con 17 artículos publicados en conjunto de los 18 que posee.

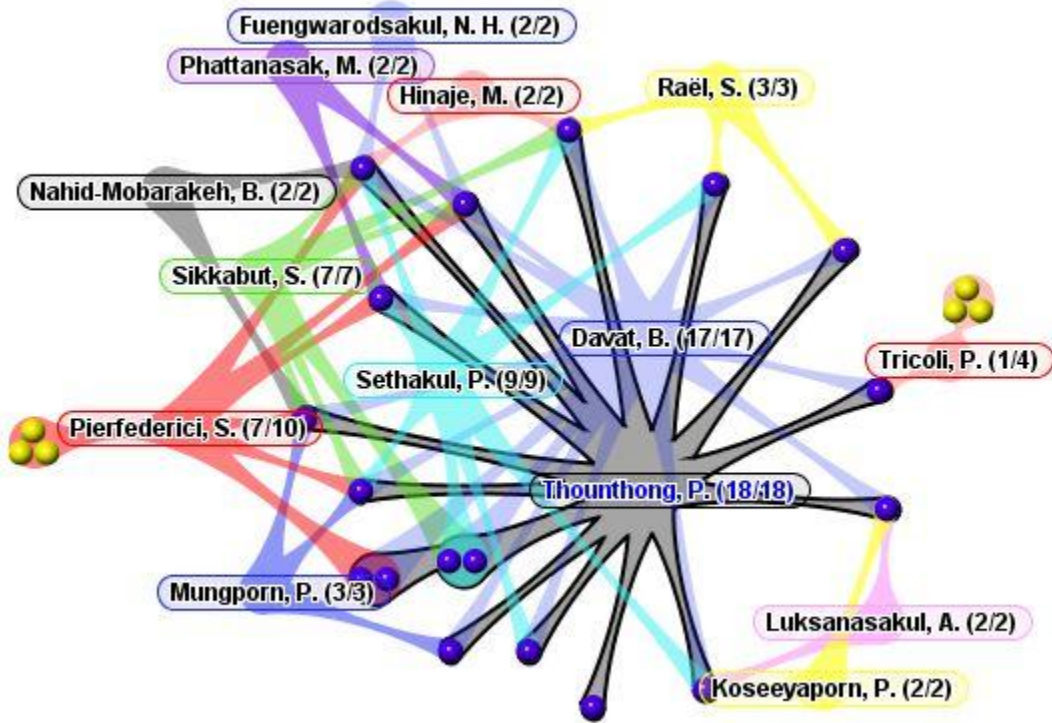


Figura 12. Red de cooperación de Thounthong, P.
 Fuente: Elaboración propia

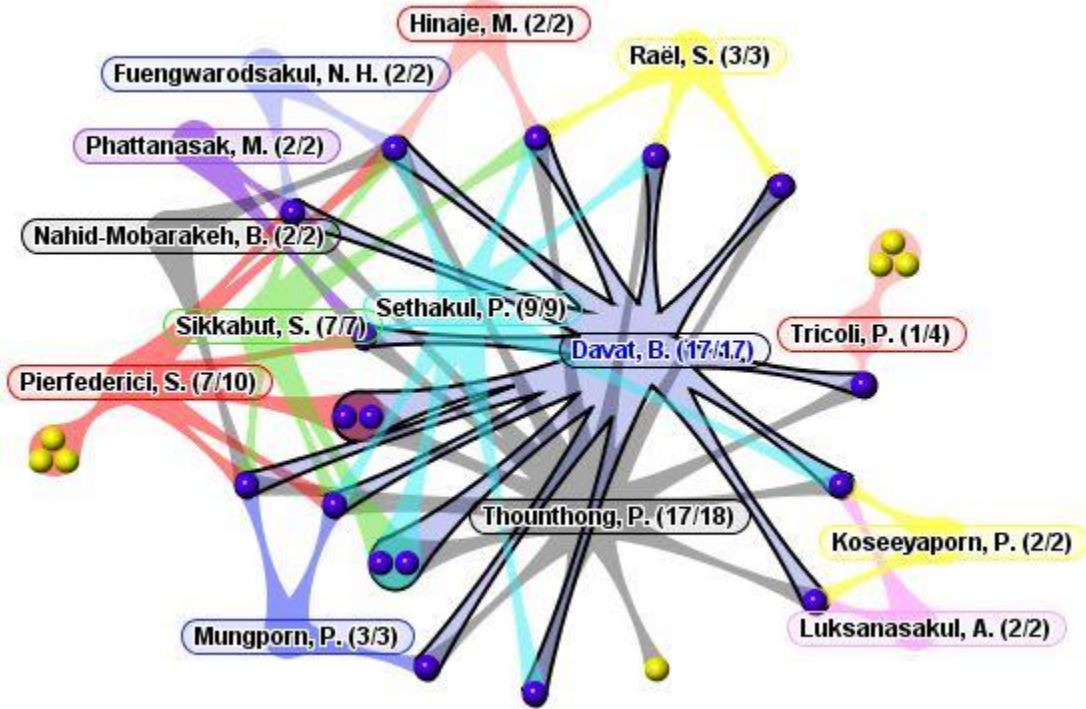


Figura 13. Red de cooperación de Davat, B.
 Fuente: Elaboración propia

En la Figura 13 se muestra la red de cooperación del segundo autor más representativo en cuanto a publicaciones científicas. Esta red está compuesta por 14 autores que se han interesado en el tema de estudio, al igual que el principal autor líder, Thounthong, P. Es de destacar que la red está compuesta por los mismos autores que Thounthong, lo que da a saber que estos dos autores han trabajado en conjunto su mayor cantidad de artículos y estos han sido elaborados en unión con los mismos autores.

Finalmente, la Figura 14 evidencia la red de cooperación de Miller, J.M., tercer autor más representativo en publicación de artículos; su red está compuesta sólo por 13 personas que se han interesado en trabajar en la temática. El presente autor, a diferencia de los dos autores anteriores ha trabajado en conjunto con gran cantidad de otras personas, y no se ha dedicado a trabajar en su mayoría con un solo autor ya que su red se encuentra diversificada con los 13 autores que la conforman.

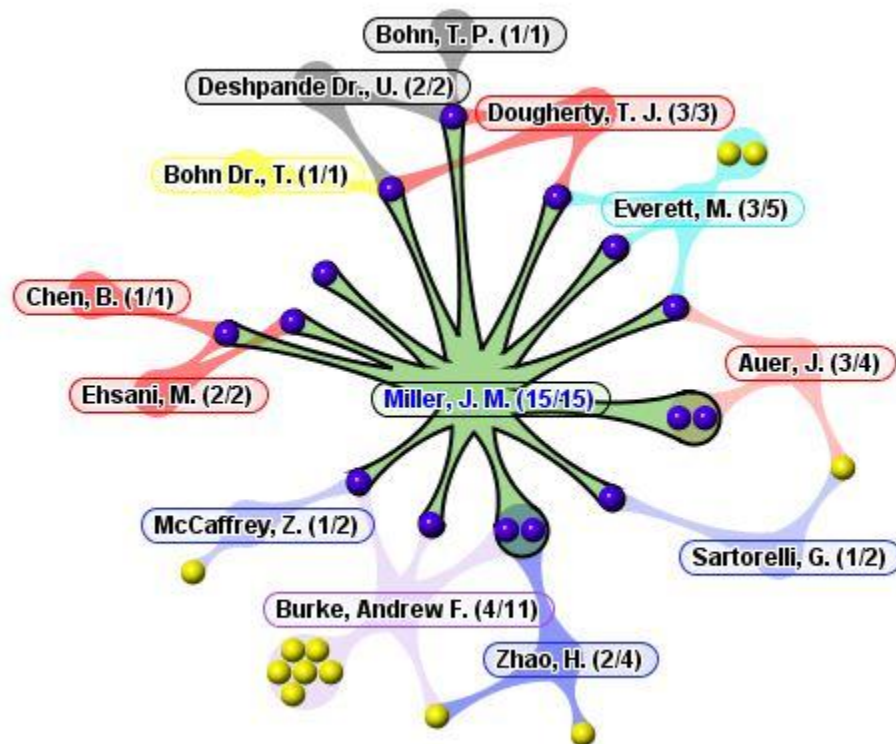


Figura 14. Red de cooperación Miller, J. M.
Fuente: Elaboración propia

2.10. Instituciones líderes

Se identificó un total de 462 instituciones con al menos una publicación indexada referente a los sistemas de almacenamiento de energía principalmente los ultracapacitores, entre los años de 1991 y 2015, sin embargo sólo se muestran las primeras 19 instituciones, como se puede ver en la Figura 15.

Se puede apreciar que no hay una gran brecha entre las diferentes instituciones, ya que entre la institución que encabeza la lista y la segunda solo existen tres artículos de diferencia, y la segunda a su vez respecto a la tercera institución tienen una diferencia de cinco publicaciones científicas, por lo que la competencia en cuanto a divulgaciones científicas entre las diferentes instituciones de todo el mundo se encuentra muy reñida entre sí. Se observa que de las 19 instituciones mostradas en la figura, cuatro pertenecen a China, cuatro a Francia, tres a Estados Unidos y el resto se dividen cada una en un país diferente; por lo que se puede decir que la tendencia de las publicaciones científicas se centra en diversos países en todo el mundo.

Instituciones Líderes

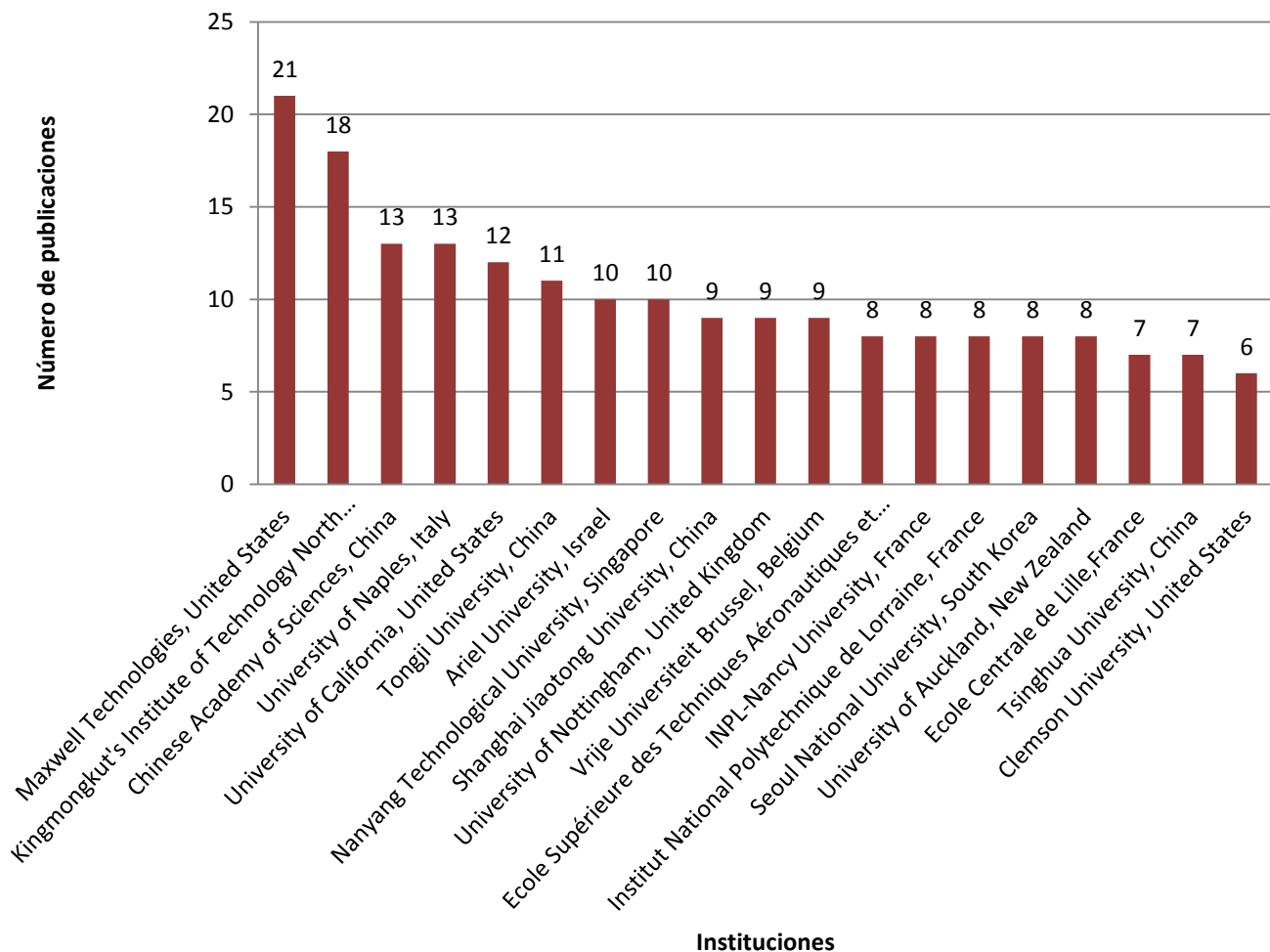


Figura 15. Instituciones líderes
Fuente: Elaboración propia

2.11. Red de cooperación de instituciones

Las asociaciones entre instituciones son muy frecuentes en el proceso de la elaboración de artículos científicos, se espera que se presenten algunas investigaciones, estudios o publicaciones en conjunto.

A continuación se muestran las redes de cooperación de las tres principales instituciones líderes en publicaciones científicas.

En la Figura 16 se puede apreciar aquellas instituciones que han trabajado en conjunto con la institución denominada Maxwell Technologies y el número de artículos que comparten. La red de cooperación está compuesta por 15 instituciones. Aunque la cantidad de publicaciones realizadas en conjunto no es muy relevante, presentando tres artículos divulgados como su mayor número, realizados en cooperación con Monolith Engines, por lo tanto su preferencia es a trabajar de manera individual, debido a que posee 10 publicaciones individualmente.

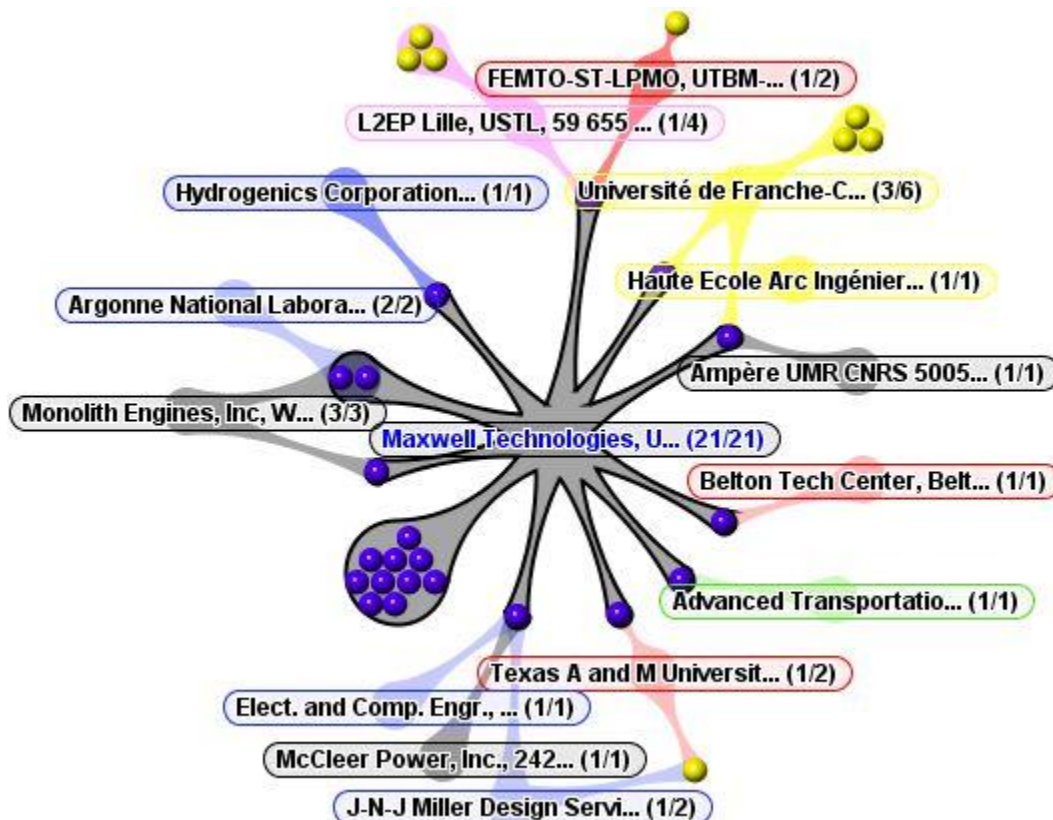


Figura 16. Red de cooperación de Maxwell Technologies
Fuente: Elaboración propia

De la misma manera, la Figura 17 presenta la red de cooperación de Kingmongkut's Institute of Technology North Bangkok, radicada en Tailandia, siendo la segunda institución líder su red es menor respecto a Maxwell Technologies, compuesta por siete instituciones. La presente institución ha realizado más publicaciones en conjunto con otras instituciones que de manera individual, específicamente con INPL-Nancy University y con Institut National Polytechnique de Lorraine.

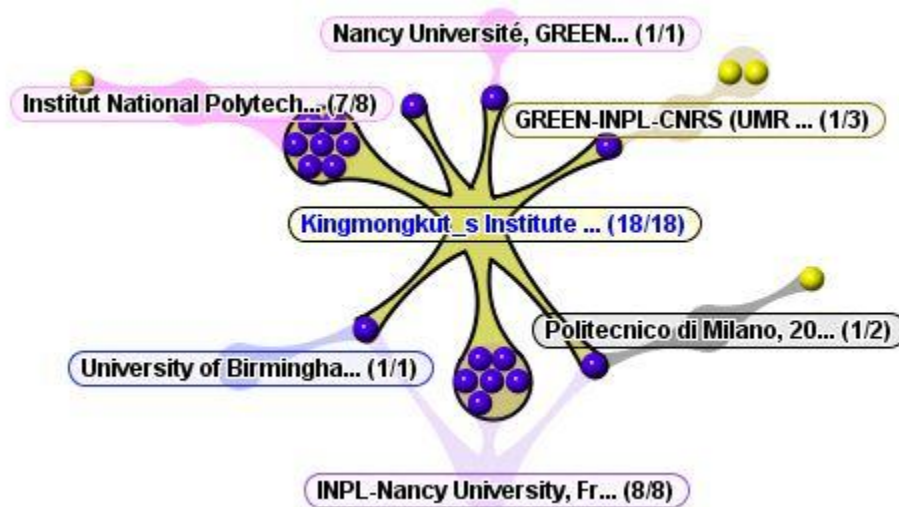


Figura 17. Red de cooperación de Kingmongkut's Institute of Technology North Bangkok
Fuente: Elaboración propia

Igualmente se puede observar en la Figura 18 la red de cooperación de la institución Chinese Academy of Sciences, radicada en China; la tendencia de esta institución es a trabajar de manera individual, ya que de los 13 artículos publicados nueve son en cooperación y cuatro en solitario.

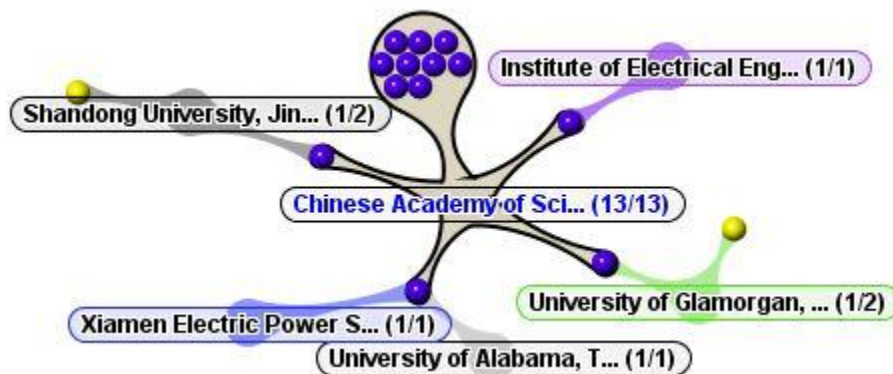


Figura 18. Red de cooperación de Chinese Academy of Sciences
Fuente: Elaboración propia

2.12. Artículos con mayor número de citaciones

La Tabla 5 presenta aquellos artículos que poseen un mayor número de citaciones, resaltando el primer artículo que posee 319 citaciones, denominado “Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles”; su número de citaciones es mayor respecto al segundo, sobrepasándolo en 21 citaciones, es cual posee como título “Supercapacitor energy storage for wind energy applications”.

Tabla 5. Artículos con mayor número de citaciones
Fuente: Elaboración propia

Ítem	Veces Citado	Nombre del artículo	Institución	País
1	319	Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles	University of California	Estados Unidos
2	298	Supercapacitor energy storage for wind energy applications	McGill University	Canadá
3	205	Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor- powered hybrid vehicle	Swiss Federal Inst. of Tech. Zurich	Suiza
4	172	Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications	University of South Alabama	Estados Unidos
5	172	Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid	University of South Carolina	Estados Unidos
6	158	A supercapacitor-based energy-storage system for elevators with soft commutated interface	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Suiza
7	144	A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles	Chrysler Group LLC	Estados Unidos
8	125	Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems	Ford Research Center Aachen	Alemania
9	118	Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications	National University of Singapore	Singapur
10	98	System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries	Seoul National University	Corea del Sur

2.13. Principales journals

La Figura 19 presenta los principales journals donde se han publicado los artículos científicos elaborados por los diferentes autores. De una muestra de un total de 310 revistas, solo se tomaron en cuenta las 16 principales. Se observa que IEEE Transactions on Power Electronics es la principal revista donde se han presentado la mayoría de artículos, contando con 16 artículos de un total de 120 artículos mostrados en la figura, equivalente a un 13,3%. Por su parte, la segunda revista denominada IEEE Transactions on Industry Applications, posee 13 divulgaciones científicas relacionadas con los ultracapacitores.

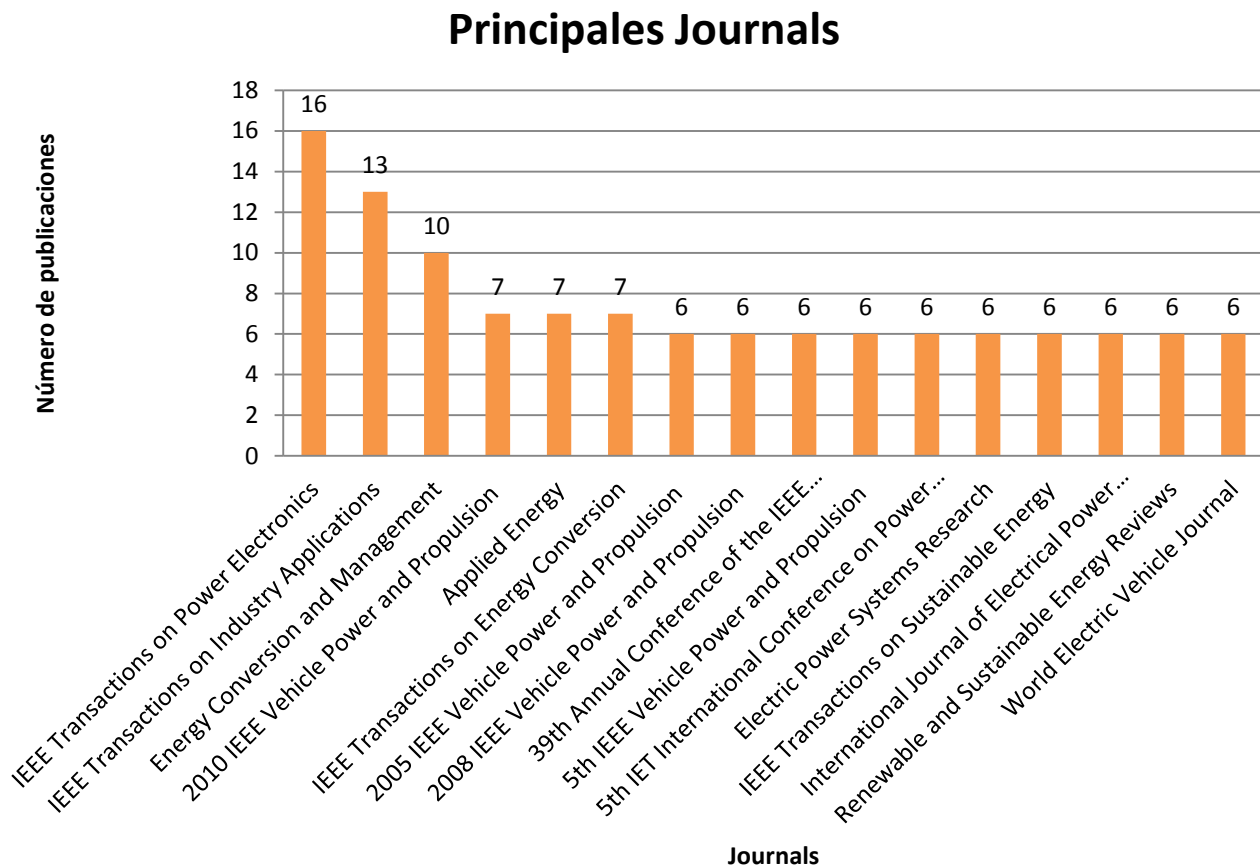


Figura 19. Principales journals
Fuente: Elaboración propia

3. CASOS DE ESTUDIO

A continuación se presentan algunas aplicaciones de acumulación de energía mediante ultracapacitores que actualmente están implementadas en el mundo.

- Un sistema de ultracapacitores instalado en tierra que almacena la energía que se desprende de las frenadas de los tranvías denominado Sitras SES (*Stationary Energy Storage System*). Es una combinación entre economía y reducción del impacto ambiental, al minimizar el consumo de energía en un 30% y por consiguiente reduce las emisiones de CO₂ al medio ambiente (Irizar, Cuadrado, & Zubiri, 2012).



Figura 20. Sitras SES, Portland

Tomado de: <http://www.raillynews.com/2013/siemens-installs-energy-storage-unit-on-trimet-lrt/>

- Sitras MES (*Mobile Energy Storage System*), es un sistema de almacenamiento de energía móvil basado en ultracapacitores, el cual se encuentra dentro del vehículo, específicamente en los techos de los trenes. El sistema de captación de energía es similar al SES, a diferencia de que el MES posee ventajas, como disminución de pérdidas, ya que la energía no tiene que recorrer tanta distancia. De esta manera posee una reducción en el consumo energético de cerca el 30% y una disminución de las emisiones de CO₂ de hasta 80 Ton por año.

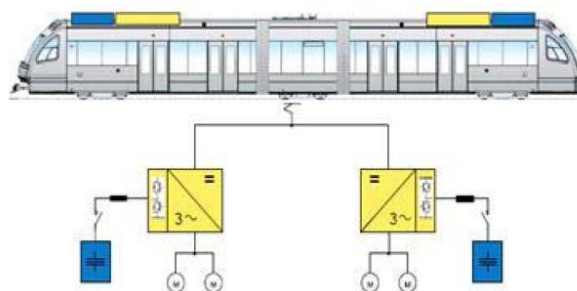


Figura 21. Sistema MES, fabricado por Siemens

Fuente: Irizar, P. E., Cuadrado, M. V., & Zubiri, E. I. (2012). Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes

- Un sistema de almacenamiento de energía combinado, por medio de un banco de ultracapacitores del Sitras MES y un sistema de tracción conformado por baterías de NiMH, este dispositivo es llamada Sitras HES (*Hybrid Energy Storage System*). Está instalado en el techo del tranvía, y se carga en los tramos que poseen catenaria, en las paradas o cuando el tren frena. Esta energía le ofrece una autonomía de tramos de hasta 2.500 metros.



Figura 22. Sitras HES, Lisboa

Fuente: Irizar, P. E., Cuadrado, M. V., & Zubiri, E. I. (2012). Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes

- Demostración de una micro-red utilizando almacenamiento de energía
- El objetivo del sistema es la integración de 950 kW de energía eólica, 250 kW de hidroenergía y 250 kW de un generador de gas natural, utilizando además ultracapacitores con una capacidad de potencia de 450 kW, con el fin de mejorar la calidad de la potencia y tener un sistema de respaldo para las cargas sensibles en caso de presentarse una interrupción de energía, de igual manera se facilita la transferencia entre las energías renovables y la conectada a la red de distribución. La construcción fue llevada a cabo en febrero de 2015, aunque todavía se encuentra en la etapa de finalización. Se encuentra ubicado en Palmdale, California – Estados Unidos y su patrocinador es el operador de la red de potencia de California – CAISO.



Figura 23. Micro – Red de con almacenamiento de energía Palmdale, California.

Tomado de: <http://www.energystorageexchange.org/projects/593>

- Sistema Fotovoltaico Universidad de California, San Diego

Un sistema fotovoltaico en conjunto con una unidad de almacenamiento de energía por medio de ultracapacitores se encuentra en la Universidad de California, en San Diego, Estados Unidos. La idea del proyecto es verificar la viabilidad técnica y financiera de un sistema fotovoltaico y las bondades que este puede traer. El sistema incluye un control predictivo de energía solar para coordinar con el sistema de almacenamiento de ultracapacitores de 28 kW, para maximizar el beneficio de incorporar un sistema fotovoltaico en el campus. El patrocinador del proyecto es el operador de la red de potencia de California – CAISO.



Figura 24. Ultracapacitores de 28 kW ubicado en la Universidad de California
Tomado de: <http://www.energystorageexchange.org/projects/1257>

- Almacenamiento de energía en trenes SEPTA

Se trata de un proyecto que busca la optimización de la energía, capturando el exceso de energía que se desprende en el momento de frenado de los trenes SEPTA mediante un proceso de frenado regenerativo, para ser utilizada luego cuando los vagones aceleran; de igual forma, se generan ingresos participando en la demanda de mercados de energía. Los ultracapacitores son tecnología desarrollada por la compañía Maxwell Tecnologías y poseen unas características como: potencia de 70 kW continua y 3,45 kWh (utilizables), 4,6 kWh (absoluto), en combinación con un Max 20P batería de ion-litio de Saft Intensium. El sistema proporcionará un apoyo el tráfico ferroviario durante su participación simultánea en el mercado PJM Interconnection para la regulación de frecuencia. Su ubicación es Filadelfia, Pensilvania en Estados Unidos.



Figura 25. Sistema de almacenamiento para los trenes SEPTA.
Tomado de: <http://www.energystorageexchange.org/projects/1430>

- Proyecto La Palma ENDESA

El proyecto tiene como objetivo demostrar la viabilidad técnica y financiera de los sistemas de almacenamiento a gran escala para mejorar la fiabilidad y el funcionamiento de las redes débiles y aisladas de las islas Canarias. El sistema se compone por tres plantas, la primera utiliza baterías de Ion-Litio con una capacidad instalada de 1 MW/3 MWh, el segundo se compone de volantes de inercia con una capacidad total instalada de 0,5 MW/18 MWh y la tercer planta consta de ultracapacitores con una capacidad de 4 MW/ 20 MWh; de esta manera se logra aumentar la confiabilidad de la red de potencia de la isla. Los ultracapacitores, integrados a una planta de energía convencional, son capaces de responder a eventos rápidos y mantener la frecuencia isla en un rango aceptable. Con un presupuesto de 11 millones de euros, el proyecto está parcialmente financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) (una Entidad Pública Empresarial, respondiendo al Ministerio de Economía y Competitividad) y la Unión Europea.



Figura 26. Proyecto La Palma, Islas Canarias, España.
Tomado de: <http://www.energystorageexchange.org/projects/612>

- FerroSmartGrid Gestión de la Energía en el Sector Ferroviario

El proyecto implica el desarrollo experimental de una red inteligente para el ferrocarril de Málaga, España. Lo que permite una gestión óptima de la red eléctrica del sistema, así como la interoperabilidad de los diferentes sistemas de transporte urbano e interurbano, integrados eléctricamente a través de nodos inteligentes, y la interacción con sus usuarios en el entorno de las estaciones del tren. FerroSmartGrid se basa en TICs, energía, almacenamiento y sistemas de electromovilidad para una gestión eficiente del consumo de energía de la red ferroviaria, llevando el concepto de redes inteligentes para el sector ferroviario. Esto marca el comienzo de un nuevo paradigma para la red ferroviaria, la optimización y la integración activa del consumidor. Se

compone de un sistema híbrido, entre baterías y ultracapacitores, lo cual permite la recuperación de la energía generada por la acción de frenado de un tren, almacenándolo en ambas baterías y ultracapacitores desarrollados por Maxwell de acuerdo con la evaluación de las necesidades del sistema a través de algoritmos de gestión de la energía. El consumo medio de energía de una subestación de tren está cerca de 79,470 kWh. El sistema de almacenamiento de energía híbrida puede recuperar cerca de 22.862 kWh de esta energía para su reutilización en otras aplicaciones tales como la integración vehículos eléctricos. Esta reducción en el consumo de energía significa una disminución de 2.120 toneladas de CO₂ por año en las emisiones contaminantes.

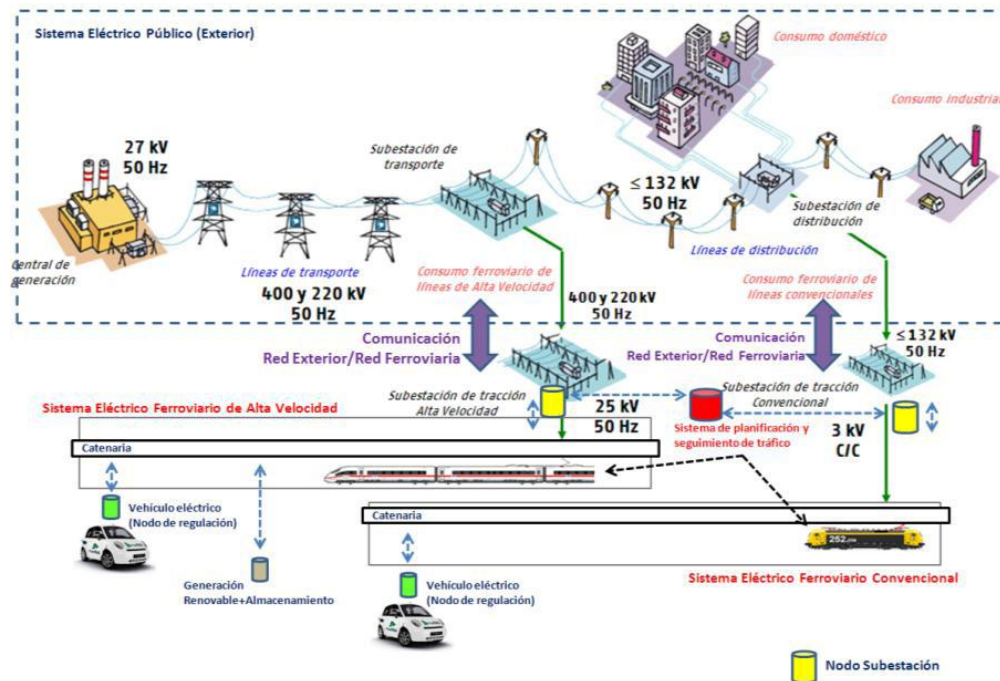


Figura 27. FerroSmartGrid Sector Ferroviario Málaga, España
Tomado de: <http://wininertia.es/>

- Ferrolinera Win Inertia

Win Inertia ha diseñado e instalado el sistema bajo un contrato con el Administrador del gobierno español de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF). En esta instalación, el sistema permite a ADIF almacenar el exceso de energía que suministra un vehículo eléctrico (EV) en ultracapacitores y en un banco de baterías. La ferrolinera se encuentra ubicada en la estación de ferrocarril de carga. La instalación también está integrada a un (PV) del generador fotovoltaico para suministrar energía adicional si es necesario. Mediante la conversión de energía cinética en energía eléctrica almacenada a través del frenado regenerativo, el sistema se recupera de 8 a 10 por ciento de la energía total utilizada por el sistema ferroviario, que luego se utiliza para alimentar la estación de carga EV.

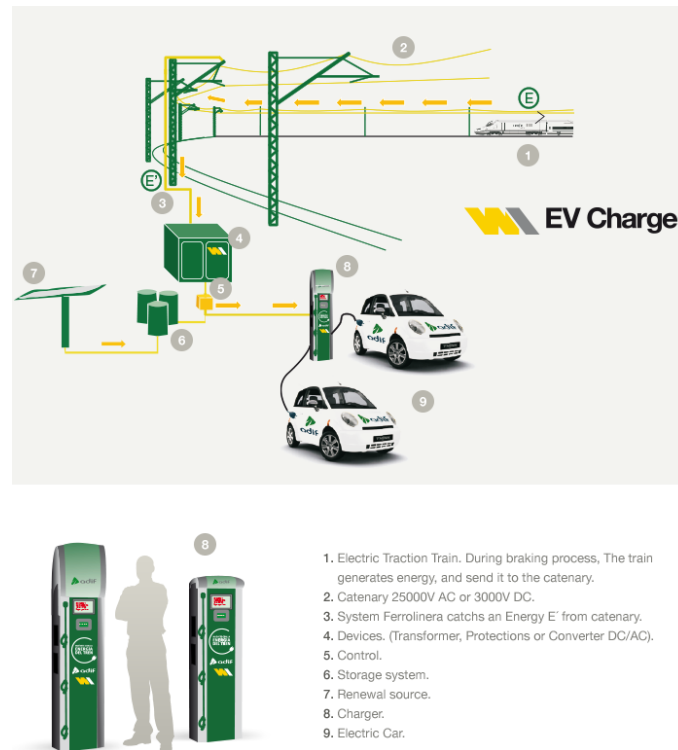


Figura 28. Ferrolinera, sistema de almacenamiento híbrido (Baterías y Ultracapacitores)
Tomado de: <http://old.wininertia.es/en/ferrolinera-2/>

- Sistema de almacenamiento de energía Metro Seúl, Daejon – Korea.

Los sistemas de frenado regenerativo basado en ultracapacitores están ubicados en siete estaciones del metro de Seúl, Daejon, Incheon y en el tren expreso de Corea (KTX), tren de alta velocidad en Seúl. A partir de la instalación de sistemas de demostración en 2009, mediante un contrato con el Instituto de Investigación de Corea del Ferrocarril del gobierno federal de Corea (KRRRI), los operadores Woorjin y del sistema ferroviario han logrado ahorros de consumo de energía de la red en más del 20 por ciento, obteniendo beneficios adicionales en la estabilidad del sistema, por estabilidad de tensión; reduciendo de esta manera la inversión en infraestructura de energía garantizando el funcionamiento ininterrumpido. Los sistemas de frenado regenerativo, van desde 750 a 1500 voltios, empleando ultracapacitores Maxwell para absorber la energía durante el frenado del vehículo ferroviario y entregar la energía almacenada a los motores eléctricos de los vehículos para la propulsión y finalmente logran estabilizar la tensión en todo el sistema. Cada instalación cuenta con 200 módulos de ultracapacitores de múltiples celdas de 48 voltios.



Figura 29. Sistema de almacenamiento del metro de Seúl.
Tomado de: <http://www.energystorageexchange.org/projects/1587>

- Puerto de aguas profundas Yangshan

Se implementó un sistema de almacenamiento de energía compuesto por ultracapacitores con una capacidad de 3 MW/ 17,2 kWh, 20 segundos de reserva de potencia. El sistema de almacenamiento de energía permite suavizar las fluctuaciones de tensión causados por el funcionamiento de la grúa y el consumo de energía que esta genera; igualmente el puerto está situado a 20 millas y el aumento de la capacidad de la línea de transmisión se consideró demasiado costoso por lo que los ultracapacitores fueron una solución a esta problemático y se evitó la necesidad de una línea de transmisión más grande.



Figura 30. Puerto de aguas profundas Yangshan
Tomado de: <http://www.maxwell.com/solutions/power-grid/power-grid-case-studies>

- Sistema de frenado regenerativo del Metro de Medellín

El proyecto consiste en la implementación de un sistema de frenado regenerativo basado en sistemas de almacenamiento de energía compuesto por ultracapacitores para el metro de Medellín. El objetivo del proyecto pretende disminuir los costos energéticos gestionando de manera óptima la energía, al ser esta almacenada en ultracapacitores cuando los trenes se encuentran frenando para ser entregada luego a la red de energía en el momento de arranque de otro tren. De igual manera, se obtienen beneficios adicionales como lo es la estabilidad de voltaje

y la protección de equipos por la disminución de fluctuaciones en la red de transmisión de energía del metro(Killer, Armstorfer, Díez, & Biechl, 2012).



Figura 31. Metro de Medellín
Tomado de: <https://www.metrodemedellin.gov.co>

4. PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS ULTRACAPACITORES

Los principales sistemas de almacenamiento de energía son mostrados en la Figura 32, divididos por las diferentes aplicaciones donde pueden ser implementados(M.A. Guerrero, E. Romero, F. Barrero, M. I. Milanés, E. González, n.d.); se puede observar que los ultracapacitores pueden utilizarse tanto para los sistemas de distribución, como en transporte y respaldo de energía, y en los sistemas de transmisión.

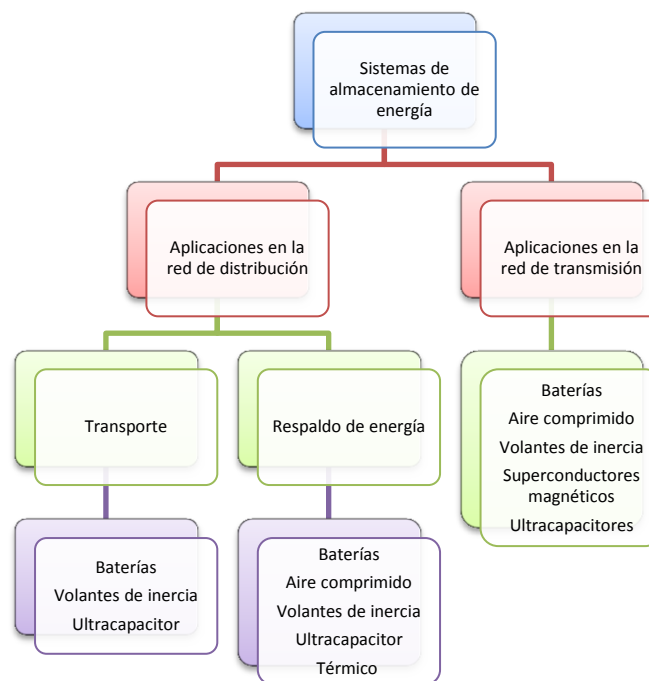


Figura 32. Aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía.

Fuente: M.A. Guerrero, E. Romero, F. Barrero, M. I. Milanés, E. González. Supercapacitor: Alternative Energy Storage Systems. Power Electronics & Electric Systems (PE&ES).

Actualmente el mercado de los ultracapacitores es muy amplio y se pueden encontrar aplicaciones de implementación del almacenamiento de energía desde el sector del transporte y la industria hasta los consumidores finales.

En el sector del transporte se pueden encontrar vehículos eléctricos e híbridos, buses, trenes, tranvías, camiones, entre otros; aprovechando la energía cinética que se desprende en el momento que frenan para cargar parcialmente los ultracapacitores para luego ser aprovechada al momento de acelerar.

En el consumidor final ya se encuentran en muchas aplicaciones, proporcionando energía de reserva para la memoria que usan los computadores personales y celulares. En una cámara fotográfica por ejemplo los ultracapacitores pueden prolongar la vida útil de la batería, suministrando parte del consumo en las funciones que consuman mucha energía, como lo es el zoom en primer plano (Schindall, 2007).

La parte industrial se puede ver su implementación en sistemas de energía renovable, como la solar y eólica, en ascensores, escaleras eléctricas, grúas, entre otros.

Por ejemplo, aplicados al sector del transporte ferroviario juegan un papel fundamental al permitir una rapidísima carga y recarga de los trenes, durante las fases de aceleración y frenado. Hay que tener en cuenta que los mayores consumos de combustible se producen durante el frenado y la aceleración de las máquinas.

La Figura 33 muestra un sistema de almacenamiento de energía mediante ultracapacitor integrado con un convertidor bidireccional. En el momento que el tren frena se recupera la energía cinética desprendida y se almacena en el ultracapacitor (Killer et al., 2012).

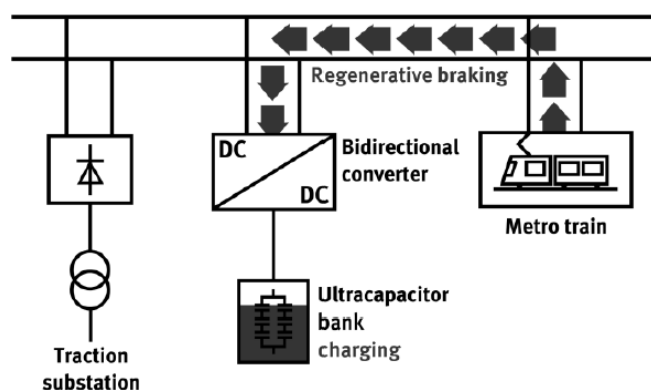


Figura 33. Sistema de recuperación de energía en el momento de frenado del tren

Fuente: Killer, A., Armstorfer, A., Díez, A. E., & Biechl, H. (2012). Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems.

De igual manera, se muestra el funcionamiento de la fuente de almacenamiento en el momento que el tren acelera, entregando energía de la red de suministro y del ultracapacitor.

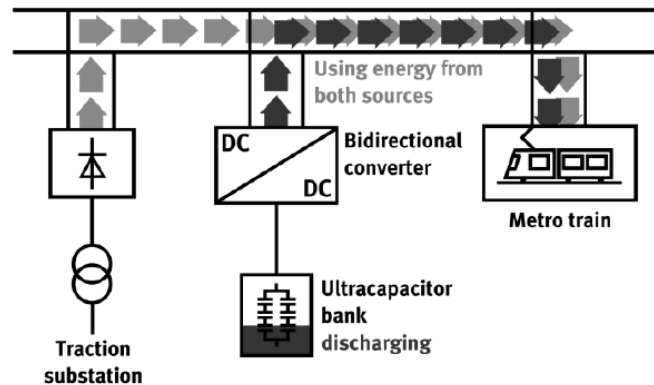


Figura 34. Aceleración con la fuente de almacenamiento adicional

Fuente: Killer, A., Armstorfer, A., Díez, A. E., & Biechl, H. (2012). Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems.

Una ventaja adicional de utilizar ultracapacitores en sistemas ferroviarios es la estabilidad de voltaje; las fluctuaciones de los niveles de voltaje, como las caídas de tensión que son producidas por las corrientes de arranque elevadas de los motores; por otro lado las sobretensiones son producidas por los altos desprendimientos de energía que se producen en el momento de frenado. En los momentos de baja densidad de trenes las fluctuaciones son más significativas, lo que lleva a una reducción de la vida útil de los equipos(Killer et al., 2012).

Por otra parte, el sistema de almacenamiento de energía por ultracapacitores tiene un amplio rango de usos en los sistemas de potencia del sector eléctrico(Smith & Sr, 2008), como se evidencia en la Figura 35.

Los sistemas eléctricos de potencia son susceptibles de experimentar cortes de energía, los cuales pueden ser clasificados en tres categorías: momentáneo, temporal o interrupción sostenida. La causa y los efectos de estas interrupciones pueden variar ampliamente entre una sobretensión, caídas de tensión, averías, transitorios e impulsos. Estas interrupciones, largas o cortas, son las causantes de millones de pesos en ingresos perdidos. La operación del sistema de potencia sería aún más complicada si las fuentes renovables de energía se integraran en la matriz energética, como por ejemplo la fotovoltaica y la eólica; la característica intermitente de estas fuentes puede crear inestabilidad de voltaje, afectando directamente la confiabilidad de la red de energía.

El sistema de energía requiere mantener un margen (reserva rodante) para satisfacer energía en los picos de demanda. Los sistemas a gran escala de energía utilizan unidades de reserva rodante para compensar la demanda de energía y las interrupciones que se presenten. Las unidades de alimentación ininterrumpida (UPS) son utilizadas para suministrar energía a las cargas críticas cuando se presenta una contingencia. Usualmente se utilizan turbinas de gas en combinación con las UPS para responder rápidamente a los requerimientos energéticos, pero su tiempo de reacción, aunque es muy rápido, es limitado y su densidad energética no es la suficiente para responder instantáneamente a las interrupciones momentáneas de energía(Smith & Sr, 2008).

Estas son algunas de las razones por las cuales los ultracapacitores serían una alternativa para mejorar el desempeño de los sistemas eléctricos de potencia, optimizar la operación y ayudar a suministrar energía instantáneamente en los momentos de presentarse alguna contingencia; disminuyendo de esta manera el impacto causado por las interrupciones, respondiendo en menos de un segundo, tiempo en el cual se presentan la mayoría de contingencias.

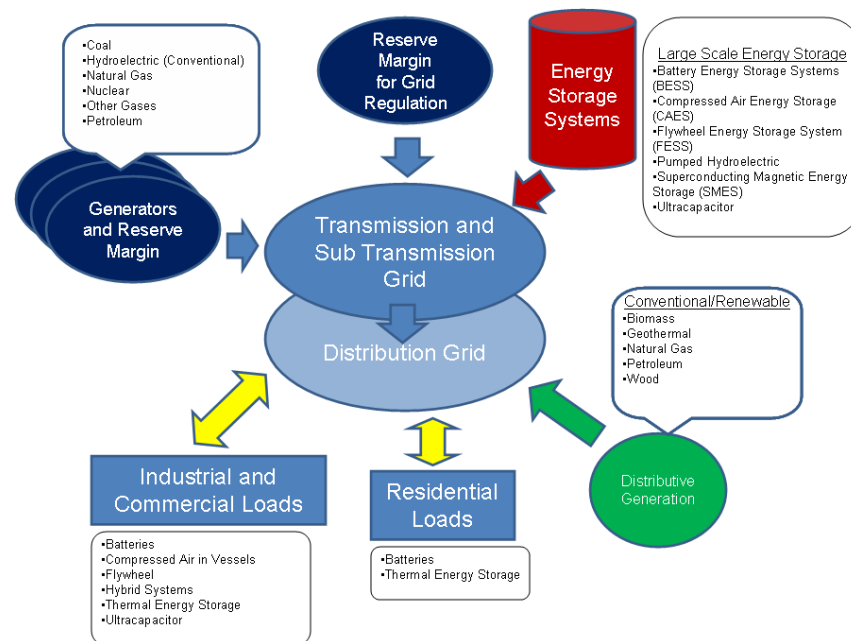


Figura 35. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sistema eléctrico de potencia

Fuente: Smith, S. C., & Sr, P. K. Sen. (2008). Ultracapacitors and energy storage: Applications in electrical power system.

Enfocándose en tres principales aplicaciones de los ultracapacitores, podemos encontrar aplicaciones para componentes electrónicos, movilidad y en el campo de la medicina, como se describe a continuación:

4.1. Dispositivos electrónicos

Empresas fabricantes de teléfonos celulares y equipos para las telecomunicaciones se han interesado e invertido recursos financieros y de personal para el desarrollo de dispositivos que utilicen sistemas de almacenamiento de energía mediante ultracapacitores (Schultz & Querques, 2014). Fabricantes de teléfonos celulares con patentes y publicaciones científicas son Blackberry, Motorola, Qualcomm y Samsung. Los fabricantes de semiconductores también han invertido en el desarrollo de componentes con ultracapacitores. Estos sistemas de almacenamiento son fundamentales para los avances de dispositivos electrónicos personales. También hay inversiones de otras empresas como Powermat que han desarrollado los cargadores inalámbricos para los dispositivos electrónicos personales. Otras multinacionales en el campo de la electrónica como General Electric, Philips, Sony y Honeywell poseen grandes avances en investigación relacionada con los ultracapacitores que probablemente apoyarán múltiples productos de sus portafolios.

4.2. Transporte

El transporte es considerado como la aplicación de mayor probabilidad en el uso de sistemas de almacenamiento de energía por medio de ultracapacitores. Los ultracapacitores han sido reconocidos por su papel fundamental en la gestión de la energía de los vehículos híbridos y eléctricos. Los ultracapacitores pueden recoger gran cantidad de potencia cuando un vehículo se encuentra frenando y luego proporcionar a este vehículo esa potencia cuando se pisa de nuevo el acelerador. Los principales fabricantes de automóviles empleando en sus desarrollos tecnologías de ultracapacitores son General Motors, Ford, Daimler, Honda, Hyundai, Peugeot y Volvo. Tesla, fabricante de vehículos eléctricos de gama alta, también está desarrollando tecnologías que relacionan los ultracapacitores. Otros fabricantes de partes automotrices también están invirtiendo en tecnologías que utilizarán ultracapacitores y a finales de 2011 les fueron 32 patentes (Schultz & Querques, 2014). También se incluyen en esta categoría son los fabricantes de equipos pesados tales como Caterpillar y Oshkosh.

4.3. Equipos para la medicina

Fabricantes de equipos médicos han invertido en el desarrollo de productos que utilizan las propiedades únicas que ofrecen los ultracapacitores. Estos equipos incluyen el desarrollo de audífonos, implantes cocleares, sistemas de monitoreo de la diabetes, marcapasos, dispositivos de control del dolor y otros dispositivos médicos. Todos estos dispositivos requieren la administración de energía de manera confiable y el avance de las tecnologías de ultracapacitores podrían habilitar estas características nuevas y mejoradas implementadas por estas industrias. Los principales desarrolladores de estas tecnologías son Advanced Bionics Corporation, Merck y Boston Scientific.

Observando las aplicaciones donde pueden emplearse los ultracapacitores, empresas como Maxwell y Nesscap realizan un enfoque en diversos sectores que pueden beneficiar de las características por las cuales están compuestas los ultracapacitores ("Maxwell Technologies," 2015). Algunas de estas aplicaciones son mostradas a continuación:

- **Autobuses**

Las emisiones de carbono, el agotamiento de los recursos naturales, la congestión del tráfico y el creciente costo de los combustibles fósiles son todos temas que estimulan al mundo para buscar medios alternativos de transporte. Autobuses de transporte público son ahora capaces de reducir las emisiones hasta en un 75% mediante el uso de sistemas de propulsión híbridos eléctricos (HEV). Estos vehículos son impulsados por un motor eléctrico y un motor interno convencional más pequeño de lo normal de combustión interna que funciona en períodos de máxima eficiencia. En estos sistemas se emplea un sistema de frenado regenerativo. Ese sistema se compone de ultracapacitores que absorben y almacenan prácticamente toda la energía cinética cuando se presenta el frenado de modo que pueda ser utilizado más adelante cuando el autobús sea puesto en marcha nuevamente.

- **Camiones de carga pesada**

La regulación en la industria de camiones cada vez es más estricta en materia de emisiones de gases contaminantes y en la reducción en el uso de combustible. De igual manera, esta industria se basa cada vez más en el uso de baterías para suministrar energía en el arranque del camión y para aquellas cargas eléctricas internas, como la iluminación, montacargas, puertas, ascensores, y otras cargas de alto consumo energético. Una alternativa importante para suministrar el consumo energético en el arranque del camión son los ultracapacitores, de esta manera las baterías son designadas solo al uso para las cargas eléctricas internas.

- **Automóviles**

La normatividad en materia ambiental cada día impulsa a las compañías automotrices a mejorar sustancialmente los vehículos para cumplir con las normas de emisiones de CO₂. De igual manera, la demanda creciente de vehículos promueve el desarrollo en la movilidad para reducir el peso, el consumo de combustible, captura y recuperación de energía, entre otros. En consecuencia, los sistemas de almacenamiento de energía mediante ultracapacitores surgen como una alternativa para ser implementada en los sistemas de frenado regenerativo, sistemas de arranque y parada, sistemas de estabilidad de voltaje, turbocompresores eléctricos, entre otros.

- **Trenes y tranvías**

Los ultracapacitores en estos sistemas deben ser robustos y confiables, proporcionando tiempos de vida en operación largos y bajos requerimientos de mantenimiento. Además, los dispositivos de almacenamiento deben operar de manera eficiente en condiciones de operación pesadas. En esta aplicación se utilizan estos sistemas de almacenamiento de energía en frenado regenerativo, propulsión asistida y estabilidad de tensión.

- **Elevadores y grúas**

Muchos fabricantes de montacargas están empleando ultracapacitores para elaborar ascensores eléctricos, disminuyendo la presión sobre las baterías cuando se acciona la carretilla elevadora. En muchas operaciones de los almacenes grandes, las baterías utilizadas en las carretillas elevadoras tienen algunas limitaciones. Usualmente un operador de carretilla elevadora agota la batería a un nivel que es insuficiente para alimentar esta carretilla, lo que requiere un cambio de la batería en la mitad del turno. Esta situación se agrava en entornos donde el almacén se encuentra en condiciones de refrigeración, como lo son los almacenes de alimentos, debido a que el rendimiento de una batería de acumuladores de plomo-ácido se degrada con la disminución de la temperatura. Al utilizar ultracapacitores o sistemas de almacenamiento híbrido, se implementa una solución de energía limpia, mejorando la productividad con reabastecimiento rápido, tiempo de ejecución extendido, mantenimiento reducido y se reducen los costos de infraestructura. Mediante el uso de ultracapacitores en las grúas de puerto, se están proporcionando soluciones innovadoras a las autoridades portuarias, ofreciendo ahorros de hasta un 20 por ciento el consumo de diesel realizado a través de la recuperación de energía("Maxwell Technologies," 2015).

- **Sistemas de reserva de energía y UPS**

El almacenamiento de energía por medio de ultracapacitores proporciona múltiples beneficios relacionados con la calidad de la potencia, disminuyendo los indicadores de calidad de la energía SAIDI y SAIFI. En el caso de interrupciones de energía o fluctuaciones de la misma, los ultracapacitores pueden suministrar de manera rápida la potencia requerida por las cargas, hasta que el generador o la fuente de energía restablezcan el servicio de energía.

- **Soporte a la generación de energía**

El almacenamiento de energía por ultracapacitores ofrece ventajas a los generadores de energía independientes y empresas de servicios públicos por igual, incluyendo la generación de energía renovable como la solar y eólica, así como la generación de energía por combustible tradicional. De esta manera, se aumenta la confiabilidad de los sistemas y se aumenta el tiempo de vida útil, de igual forma la capacidad de respuesta rápida de los ultracapacitores hace que se mejore la operación del sistema de potencia. Algunas de las aplicaciones que se incluyen en la generación de energía son:

- Soporte a la intermitencia de las energías renovables
- Regulación de frecuencia
- Estabilidad de tensión
- Calidad de la energía
- Nivelación de carga
- Reserva rodante

Por otra parte, el fabricante de ultracapacitores Nesscap indica que la tasa media de crecimiento del mercado de ultracapacitores en los últimos 10 años ha sido del 25% y la mayoría de los analistas predicen que la tasa de crecimiento del mercado en los próximos 10 años será más del 30% respecto al año anterior (Nesscap Ultracapacitors, 2015).

Los principales mercados que ha cubierto esta compañía se encuentran en consumidores, industrial y en el sector automotriz. A continuación se presentan algunas aplicaciones que han utilizado ultracapacitores para mejorar sus características:

- **Consumidores**

En este sector se pueden encontrar productos para taladros portátiles de mano, destornilladores, linternas, celulares, entre otros, como se puede evidenciar en la Tabla 6.

Tabla 6. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sector consumidor
Fuente: (Nesscap Ultracapacitors, 2015)

Aplicación	Funciones
Juguetes	Reemplazo de la batería
Dispositivos electrónicos portátiles	Almacenamiento de energía

Aplicación	Funciones
Linternas eléctricas	
Herramientas eléctricas	
Teléfonos celulares	
Equipos para telecomunicaciones	

- **Sector industrial**

Los ultracapacitores en este sector sirven en la mayor parte como sistemas de respaldo. También son aplicados al desarrollo de vehículos híbridos industriales, tales como carretillas elevadoras, camiones, maquinaria agrícola, excavadoras y aplicaciones en transporte público como autobuses, trenes, metros y tranvías. Algunas aplicaciones representativas se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sector industrial
Fuente: (Nesscap Ultracapacitors, 2015)

Aplicación	Funciones
Sistemas robóticos	Memoria de seguridad
Actuadores	Energía de reserva
Máquinas para soldar	Almacenamiento de energía Fuente auxiliar de energía
Carretilla elevadora	
Máquina excavadora	
Energías renovables	Soporte a la intermitencia
Operación del sistema eléctrico	Regulación de frecuencia Estabilidad de tensión

- **Sector automotriz**

El sector automotriz es el que posee el segmento de mercado más grande en cuanto a los ultracapacitores. Las aplicaciones más relevantes son el frenado regenerativo y el aprovechamiento posterior en los sistemas. A continuación se presentan algunas aplicaciones relevantes:

Tabla 8. Aplicaciones de los ultracapacitores en el sector automotriz
Fuente: (Nesscap Ultracapacitors, 2015)

Aplicación	Funciones
Arranque de motores	Potencia pico Arranque en frío
Vehículos híbridos	Sistema de almacenamiento Asistencia en la potencia pico Fuente auxiliar de energía
Vehículos de carga pesada	
Autobuses públicos	
Trenes, tranvías y metros	

5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS ULTRACAPACITORES

En la Tabla 9 son mostrados algunos parámetros generales de los sistemas de almacenamiento de energía denominados ultracapacitores. Los ultracapacitores mencionados son usados como sistemas de respaldo en lugares de operación crítica como hospitales, aeropuertos o como sistemas de suministro en horas pico, debido a la gran capacidad de energía eléctrica que poseen. También son empleados frecuentemente para generación de energía eléctrica en zonas no interconectadas mediante fuentes de energía renovable, debido a que son muy útiles para abastecer pequeñas poblaciones y su ventaja es el mínimo impacto ambiental que ocasiona.

Se observa que en general los ultracapacitores cuentan con un ciclo de vida útil de 1.000.000 de ciclos, debido a que cerca del 60% de los dispositivos mostrados en la tabla poseen este valor de ciclo de vida. Similar comportamiento se presenta con el rango de operación, donde el 63% están en un rango entre el -40°C y 65°C .

Para la densidad de energía, dada en (Wh/kg) , se tiene un valor mínimo de 0,7 y un valor máximo de 7,6; estos valores se dan cuando se posee un ultracapacitor con un valor de 5 Faradios y uno de 3.400 Faradios, respectivamente. Por lo tanto, a medida que aumenta el número de faradios del ultracapacitor aumenta la densidad de energía estableciendo una relación proporcionalmente lineal.

Por su parte, la potencia específica (W/kg) , posee un valor mínimo de 1.202 y un valor máximo de 58.400. De igual manera a medida que aumenta la capacitancia de los ultracapacitores este valor aumenta. Seguidamente el valor mínimo del almacenamiento de energía se encuentra asociado a 0,0036 Wh y el valor máximo es de 166 Wh, este último parámetro tiene una relación muy estrecha con el valor de voltaje, ya que a medida que aumenta el voltaje DC nominal del ultracapacitor mayor es la cantidad de energía que puede almacenar.

Tabla 9. Especificaciones técnicas de los ultracapacitores
Fuente: Elaboración propia

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
BMOD0165 P048 C01	Maxwell Technologies	165	48	1.900	-40°C a 65°C	1.000.000	N.D.	N.D.	53	Vehículos híbridos, trenes, sistemas UPS.
BMOD0130 P056 B03	Maxwell Technologies	130	56	1.900	-40°C a 40°C	14 Años	3,1	2600	57	Sistemas UPS
BMOD0063 P125 B08	Maxwell Technologies	63	125	1.900	-40°C a 65°C	1.000.000	2,3	1700	140	Buses, trenes, trolebús, transporte de carga pesada.
BMOD0006 E160 B02	Maxwell Technologies	5,8	160	170	-40°C a 65°C	10 Años	4	2500	21	Turbinas eólicas, sistemas UPS
BCAP0310	Maxwell Technologies	310	2,7	250	-40°C a 65°C	500.000	5,2	6600	0,31	Turbinas eólicas, sistemas UPS, herramientas portables, sistemas industriales electrónicos, equipos médicos
BMOD0058 E016 B02	Maxwell Technologies	58	16	170	-40°C a 65°C	10 Años	3,3	2200	2,1	Turbinas eólicas, sistemas UPS
BMOD0094 P075 B02	Maxwell Technologies	94	75	1.900	-40°C a 65°C	15 Años	2,9	2100	73	Turbinas eólicas, sistemas UPS
BMOD0083 P048 B01	Maxwell Technologies	83	48	1.150	-40°C a 65°C	1.000.000	2,6	2700	27	Vehículos híbridos, trenes, sistemas

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
										UPS.
BCAP3400	Maxwell Technologies	3400	2,85	2.000	-40°C a 65°C	1.000.000	7,6	8500	3,95	Sistemas móviles, turbinas eólicas, vehículos híbridos, trenes, sistemas UPS, equipos industrial pesado
BCAP2000	Maxwell Technologies	2000	2,7	1.500	-40°C a 65°C	1.000.000	5,6	6900	2,03	Sistemas móviles, turbinas eólicas, vehículos híbridos, trenes, sistemas UPS, equipos industrial pesado
ESHSR-0003C0-002R7	Nesscap Ultracapacitor	3000	2,7	243	-40°C a 65°C	1.000.000	5,6	6200	3	Vehículos eléctricos, vehículos híbridos, grúas, autobuses de servicio público.
EMHSR-0108C0-016R0S	Nesscap Ultracapacitor	108	16	590	-40°C a 65°C	1.000.000	1	1900	3,8	Sector transporte y automotriz, turbinas eólicas, sistemas UPS.
EMHSR-0266C0-016R0S	Nesscap Ultracapacitor	266	16	1.100	-40°C a 65°C	1.000.000	2	2200	9,4	Sector transporte y automotriz, turbinas eólicas,

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
										sistemas UPS.
EMHSR-0036C0-048R0S	Nesscap Ultracapacitor	36	48	580	-40°C a 65°C	1.000.000	1,2	2200	11,5	Autobuses híbridos, Sector transporte y automotriz, turbinas eólicas, sistemas UPS.
EMHSR-0083C0-064R0S	Nesscap Ultracapacitor	83	64	1.400	-40°C a 65°C	1.000.000	2,7	3000	47,2	Turbinas eólicas, sistemas UPS.
EMHSR-0062C0-086R0S	Nesscap Ultracapacitor	62	86	1.400	-40°C a 65°C	1.000.000	3	3300	63,6	Sistema de control de turbinas eólicas, sistemas UPS.
EMHSR-0062C0-125R0SR2	Nesscap Ultracapacitor	62	125	2.000	-40°C a 65°C	1.000.000	2	1800	134	Aplicaciones ferroviarias
IMOD080V01 2P1M	IOXUS	11,7	81	200	-40°C a 65°C	1.000.000	2,7	3000	10,6	Sistemas de energía renovable, sistema de control de turbinas eólicas, sistemas de respaldo UPS.
RSC2R7208LR	IOXUS	2.100	2,7	1.900	-40°C a 65°C	1.000.000	5,5	11.200	2,12	Sector automotriz, sistema de control de turbinas

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
										eólicas, dispositivos electrónicos de mano.
RSC2R7357SR	IOXUS	365	2,7	248	-40°C a 65°C	1.000.000	5,6	4.900	0,37	Sector automotriz, sistema de control de turbinas eólicas, dispositivos electrónicos de mano.
iMOD016V05 8P1M-00A	IOXUS	58	16,2	1.000	-40°C a 65°C	500.000	2,8	1.800	2,13	Sistema de control de turbinas eólicas, respaldo de sistemas UPS, energías renovables.
iMOD081V04 2P3L-00A	IOXUS	41,5	81	3.600	-25°C a 65°C	500.000	3,8	7.500	38	Telecomunicaciones, energías renovables, respaldo de sistemas UPS.
IRB1250K270 CT	IOXUS	1320	2,7	1.800	-40°C a 85°C	1.000.000	4,4	12.000	1,25	Sector automotriz, sistemas de respaldo UPS.
LSUM 016R2C 0500F EA	LS Ultracapacitor	500	16,2	2.200	-40°C a 65°C	1.000.000	3,6	7.500	18,2	Sistema de respaldo UPS,

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
										autobuses híbridos.
LSUM 016R8L 0058F EA	LS Ultracapacitor	58,3	16,8	200	-40°C a 65°C	500.000	3,8	5.300	2,3	Dispositivos electrónicos, sistemas de respaldo UPS.
LSUM 048R6C 0166F EA YJ	LS Ultracapacitor	166	48,6	2.200	-40°C a 65°C	1.000.000	3,2	7.000	54,4	Vehículos de carga pesada, grúas, vehículos eléctricos e híbridos.
LSUM 086R4C 0093F EA	LS Ultracapacitor	93	86,4	1.950	-40°C a 65°C	1.000.000	3,7	6.352	96,4	Sistemas ferroviarios, vehículos eléctricos e híbridos, sistemas de respaldo UPS.
LSUM 129R6C 0062F EA	LS Ultracapacitor	62,5	129,6	2.300	-40°C a 65°C	1.000.000	2,8	6.000	145,8	Sistemas ferroviarios, vehículos eléctricos e híbridos, sistemas de respaldo UPS.
SMOD 48 V 44 F	Skeleton Technologies	44	48	835	-40°C a 60°C	1.000.000	2,3	7.600	14,1	Sistemas de parada y arranque, frenado regenerativo.

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
SMOD 160 V 47 F	Skeleton Technologies	47	160	2.000	-40°C a 60°C	1.000.000	3,8	3.200	166	Energía eólica, estabilidad de la red, sistemas de respaldo UPS.
SCHP0250	Skeleton Technologies	250	2,85	310	-40°C a 60°C	1.000.000	4,9	58.400	0,28	Trenes, tranvías, camiones, maquinaria para la industria.
SCHP2100	Skeleton Technologies	2.100	2,85	2.410	-40°C a 60°C	1.000.000	5,4	40.100	2,37	Trenes, tranvías, camiones, maquinaria para la industria.
Ultracap 5F/2,3V	EPCOS	5	2,3	2	-30°C a 70°C	90.000 horas	0,7	1.202	0,0036	Equipos médicos, dispositivos electrónicos, telecomunicaciones.
Ultracap 100F/2,3V	EPCOS	100	2,3	30	-30°C a 70°C	90.000 horas	2	3.971	0,027	Herramientas de potencia, dispositivos electrónicos, dispositivos móviles
Ultracap 1200F/2,3V	EPCOS	1.200	2,3	300	-30°C a 70°C	90.000 horas	2,1	3.499	0,88	Sistemas de respaldo UPS, frenado regenerativo,

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
										systemas de control de energía eólica.
Ultracap 450F/14V	EPCOS	450	14	400	-30°C a 70°C	90.000 horas	2,65	2.580	11,9	Frenado regenerativo, trenes, tranvías, sistemas de respaldo UPS.
Ultracap 67F/42V	EPCOS	67	42	300	-30°C a 70°C	90.000 horas	1,64	2.756	16,4	Energías renovables, estabilidad de la red, sistemas de respaldo UPS, vehículos eléctricos e híbridos.
Ultracap 100F/56V	EPCOS	100	56	400	-30°C a 70°C	90.000 horas	1,56	1.556	43,55	Energías renovables, estabilidad de la red, sistemas de respaldo UPS, vehículos eléctricos e híbridos.
SNC 12-1200	SAFT	1.200	12	1.602	-40°C a 50°C	300.000	N.D.	N.D.	30,5	Vehículos de carga pesada, buses, camiones,

Producto	Fabricante	Capacitancia (F)	Voltaje de entrada (VDC)	Máxima corriente (A)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (Ciclos)	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Almacenamiento de energía (Wh)	Aplicación
										ferrocarriles.
SNC 24-500	SAFT	500	24	1.779	-40°C a 50°C	300.000	N.D.	N.D.	52,7	Vehículos de carga pesada, buses, camiones, ferrocarriles.

6. DIAGNÓSTICO DE LA REGULACIÓN PARA ULTRACAPACITORES EN COLOMBIA

El almacenamiento de energía mediante ultracapacitores carece de una regulación definida en Colombia, aunque suponen de una solución a problemáticas medioambientales, técnicas y de eficiencia del actual sistema eléctrico colombiano. La integración en el sistema de investigación y desarrollo de Colombia, la investigación en nuevos materiales van a hacer que reduzca el precio del almacenamiento y de la movilidad eléctrica, aprovechando su potencial en el ámbito del transporte y las ciudades sostenibles; de esta manera puede que se presente un capítulo en el sistema de regulación colombiano orientado a los ultracapacitores o almacenamiento de energía.

Los principales factores que impulsarían la implementación de los ultracapacitores serían políticas públicas que incentiven el uso de vehículos eléctricos, la generación distribuida, fuentes no convencionales de energía y programas de uso eficiente de los recursos energéticos. Por lo tanto, se presenta un énfasis en la regulación para integrar las fuentes de energía renovable en Colombia, ya que son una aplicación susceptible de implementar en gran proporción sistemas de almacenamiento de energía mediante ultracapacitores.

La incorporación de alternativas de generación de energía eléctrica a través de fuentes no convencionales dentro de la matriz energética ha venido tomando fuerza en el ámbito Colombiano. Debido a esto el gobierno se ha visto en la tarea de soportar e incentivar este tipo de soluciones a través de una normatividad consistente con las necesidades que el ambiente energético del país demanda.

A continuación se presentan algunas disposiciones regulatorias para incentivar el uso de fuentes no convencionales de energía en Colombia.

- Ley 697 de 2001

Decretada el 3 de Octubre de 2001, la ley 697 busca fomentar el uso racional y eficiente de la energía, además promueve la utilización de energías alternativas y dicta otras disposiciones. Contiene 11 artículos.

Reglamentada parcialmente por el Decreto 3683 de 2003.

En su artículo 1 define el concepto de Uso Racional y Eficiente de la Energía -URE y el alcance global de la ley, como sigue a continuación:

“Declárase el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.”(Congreso de Colombia, 2001).

- Ley 788 de 2002

La ley 788 fue decretada el 27 de Diciembre de 2002 y con ella se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones.

En los artículos 18 y 95 es mencionado lo siguiente frente a la exención de impuestos para incentivar el desarrollo en el tema de Fuentes No Convencionales de Energía -FNCE.

1) Exención de impuesto de renta durante 15 años por venta de energía eléctrica obtenida a partir de biomasa, viento y recursos agrícolas, sujeto a venta de reducciones de gases efecto invernadero bajo el protocolo de Kyoto y a que se destine en un 50% a obras de beneficio social.

2) Exención de impuestos a importación de maquinaria y equipos para exportar certificados de reducción de emisiones de carbono(Congreso de Colombia, 2002, p. 20).

- **Resolución 180609 de 2006 Ministerio de Minas y Energía**

La resolución 180609 fue promulgada el 26 de Mayo de 2006 y define los subprogramas que hacen parte del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE, además de adoptar otras disposiciones(Ministerio de Minas y Energía, 2006).

- **Ley 1450 de 2011**

La ley 1450 decretada por el congreso el 16 de Junio de 2011 establece el Plan nacional de desarrollo 2010-2014.

En su artículo 105 menciona lo siguiente frente al tema de energías renovables:

“El gobierno nacional diseñará e implementará una política nacional encargada de fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en las energías solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, undimotriz y demás alternativas ambientalmente sostenibles, así como una política nacional orientada a valorar el impacto del carbono en los diferentes sectores y a establecer estímulos y alternativas para reducir su huella en nuestro país.”(Congreso de Colombia, 2011).

- **Ley 1665 de 2013**

La ley 1665 fue promulgada el 16 de Julio de 2013 por el congreso de la república y aprueba el “ESTATUTO DE LA AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)”, hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009(Congreso de la Republica, 2013).

- **Proyecto de Resolución 004 de 2014 CREG**

Esta resolución fue promulgada el 23 de Enero de 2014 por la CREG con el fin de hacer público un proyecto de resolución por el cual se establece la fórmula tarifaria y las metodologías generales para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización del servicio de energía eléctrica en las zonas no interconectadas. En la resolución es ajustada la fórmula tarifaria a la realidad socio-económica actual de Colombia en la que se incluye un mayor número de tecnologías de generación eléctrica no convencionales(Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, 2014, p. 00).

- **Ley 1715 de 2014**

Puesta en marcha el 13 de Mayo de 2014, la ley 1715 regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, enmarcada en un total de 46 artículos.

En su artículo 1 menciona su objeto, el cual se muestra a continuación:

“La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda”

Esta ley basa su estructura en el proyecto de ley 278 de 2013 del Senado de la República de Colombia(Congreso de Colombia, 2014b).

7. VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES

El ejercicio de consulta a expertos tiene como finalidad identificar las aplicaciones de los ultracapacitores con mayor viabilidad de implementación y mayor potencial de desarrollo industrial y económico en Colombia. Adicionalmente busca identificar las características más relevantes que se deben considerar para una óptima penetración.

Con el fin de socializar el tema con un grupo de expertos se ha diseñado una encuesta, ver anexo 1. Estructura encuesta, que contempla los siguientes objetivos:

- Identificar las aplicaciones de los ultracapacitores con mayor viabilidad de implementación en Colombia.
- Determinar el horizonte temporal de la evolución de las aplicaciones de los ultracapacitores en Colombia.
- Detectar cual es el nivel de conocimiento que Colombia posee respecto a las aplicaciones de los ultracapacitores.
- Identificar las estrategias y aspectos de mayor impacto en el desarrollo de las aplicaciones de los ultracapacitores en Colombia.

7.1. Metodología

Con la información de las aplicaciones de los ultracapacitores recopilada a través del estudio de vigilancia tecnológica, se han seleccionado los temas y aplicaciones más relevantes que podrían ser objeto de la consulta a expertos, de acuerdo a los objetivos contemplados.

Para llevar a cabo el estudio se ha seleccionado un grupo de expertos conformado por profesionales con un alto grado de conocimiento sobre tecnologías de generación distribuida y temas afines, cuyo objetivo es evaluar las diferentes temáticas presentadas en la encuesta.

En el diseño de la encuesta se recopilan hipótesis identificadas previamente, relacionadas con las tendencias más significativas en el ámbito del almacenamiento de energía mediante ultracapacitores en los próximos años. Las hipótesis abarcan temas que comprenden: regulaciones, incentivos, mecanismos financieros, consideraciones ambientales, aspectos técnicos en la operación del sistema eléctrico, energías renovables, demanda de energía, inversión en investigación, costos de fabricación, capacidades en investigación y desarrollo, entre otros. También se cuenta con un eje de variables que solicita a los expertos sus opiniones sobre diferentes aspectos relacionados con los objetivos del estudio, tales como nivel de conocimiento, escala temporal de implementación, impactos y estrategias.

De esta forma se consigue establecer una serie de criterios para poder clasificar las diferentes temáticas dentro de su horizonte temporal, en función de la consecuencia que tendría el desarrollo de las diferentes tecnologías.

Dichas hipótesis fueron distribuidas por medio de una aplicación web en forma de encuesta a un grupo de expertos del sector eléctrico conformado por 100 profesionales, de los cuales participó un 36%, correspondiente a 36 de ellos.

Finalmente se han recopilado sus opiniones en temas que describen resultados evaluables sobre aplicaciones futuras para el contexto colombiano en temas de almacenamiento de energía mediante ultracapacitores.

7.2. Resultados

A partir de los temas que se consideraron como más relevantes, se realizó la encuesta que fue diligenciada por 36 profesionales relacionados con el sector del almacenamiento de energía, integrando la participación de personal de grupos de investigación, personal del ámbito académico, gubernamental e industrial.

7.2.1. Características de participación

La Figura 36 presenta la procedencia profesional de los expertos. La mayor parte de las respuestas recibidas provienen del sector académico, con un porcentaje del 53%, seguido por empresas con una participación del 30% y finalizando la participación con entidades estatales, 17%.

Participación de Entidades (%)



Figura 36. Distribución de características de participación
Fuente: Elaboración propia

7.2.2. Procedencia geográfica

La Figura 37 muestra la procedencia geográfica de los expertos. Se observa que esta procedencia es muy diversa, dividida en siete (7) ciudades nacionales e internacionales, aunque con un dominio notable de la ciudad de Medellín, con una participación del 55%, seguido de Bogotá, con un 28%. Es relevante el hecho de presentarse algunas respuestas extranjeras con conocimientos del contexto colombiano, esto demuestra que además de los esfuerzos que se están realizando en Colombia sobre esta temática, en otros países también consideran importante la participación en el tema.

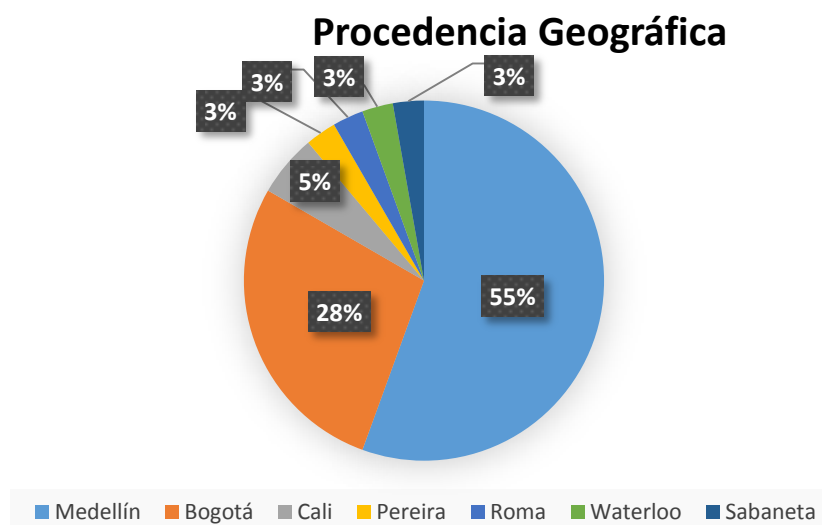


Figura 37. Distribución de procedencia geográfica de expertos
Fuente: Elaboración propia

7.2.3. Nivel de conocimiento

Cada uno de los profesionales encuestados valoró el grado de conocimiento que poseen respecto a los sistemas de almacenamiento de energía. Los resultados muestran que los expertos consideran que cuentan con un conocimiento de la temática propuesta Medio-Alto con un porcentaje de 50%, Alto con un 8% y Bajo-Medio con un 42%. Estos resultados validan que en su mayoría la información recopilada proviene de personal con conocimientos reales frente a los temas de almacenamiento de energía que se tratan en la encuesta. Es de resaltar, que la mayoría de los encuestados responden en muchos casos asignándose un valor inferior de conocimiento al que corresponde a su experiencia.

Nivel de Conocimiento (%)

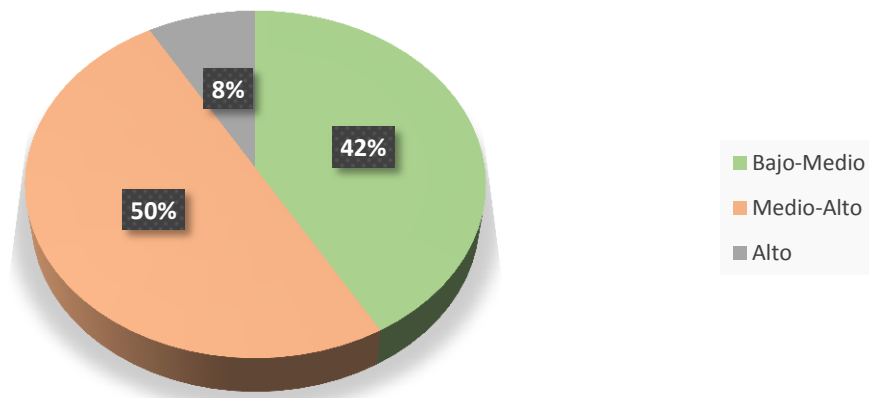


Figura 38. Nivel de conocimiento en almacenamiento de energía de los expertos encuestados

Fuente: Elaboración propia

7.2.4. Nivel de conocimiento de Colombia

Con el fin de conocer que conocimiento se posee en Colombia respecto a las aplicaciones de los ultracapacitores, se indagó a los expertos encontrando los resultados plasmados en la Figura 39. En general se puede observar que los conocimientos en cuanto a sistemas de almacenamiento de energía enfocado en ultracapacitores existentes en el país son insuficientes; exceptuando los sistemas de reserva de energía y UPS y los dispositivos electrónicos, en donde los expertos consideran que se encuentran en desarrollo.

Conocimiento en Colombia frente a las aplicaciones de los ultracapacitores (%)

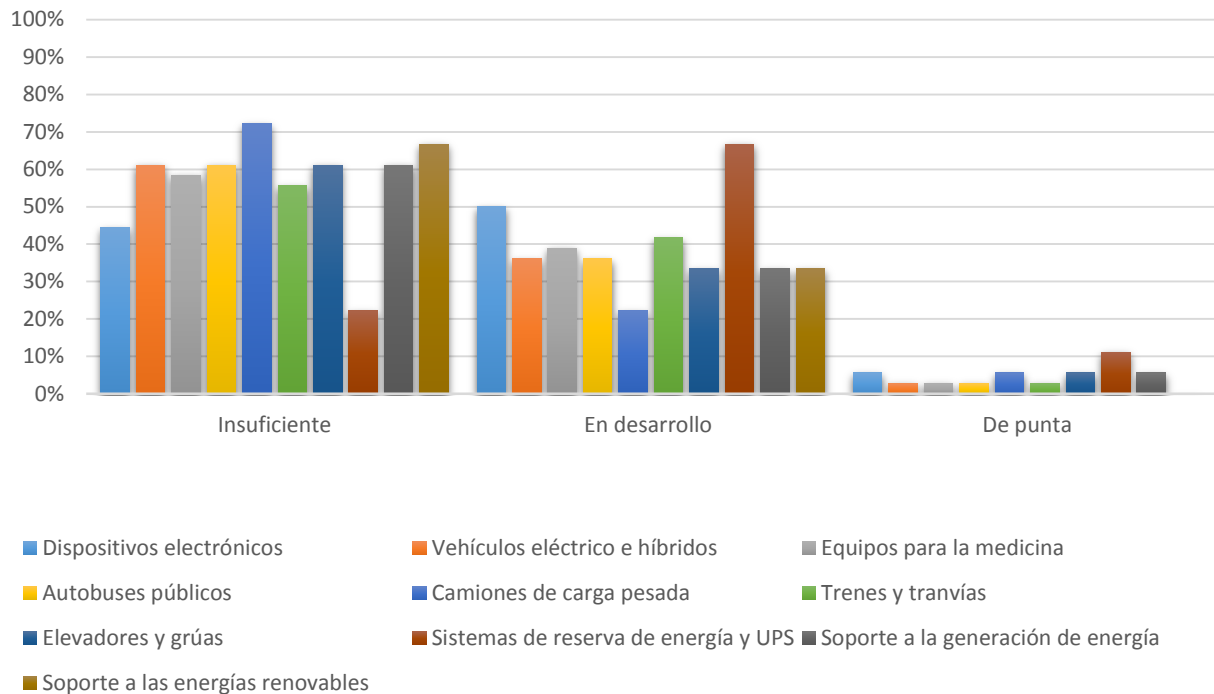


Figura 39. Conocimiento en Colombia frente a las aplicaciones de los ultracapacitores
Fuente: Elaboración propia

Utilizando el método de promedio ponderado para determinar con mayor exactitud en qué estado del conocimiento se encuentran las diferentes aplicaciones de los ultracapacitores, se asignó un peso a cada uno de los niveles de conocimiento, tomando el valor de 1 para Insuficiente, 2 para En desarrollo y 3 para De punta. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Pesos ponderados de nivel de conocimiento

Dispositivos electrónicos	Vehículos eléctrico e híbridos	Equipos para la medicina	Autobuses públicos	Camiones de carga pesada	Trenes y tranvías	Elevadores y grúas	Sistemas de reserva de energía y UPS	Soporte a la generación de energía	Soporte a las energías renovables
1,61	1,42	1,44	1,42	1,33	1,47	1,44	1,89	1,44	1,33

Las aplicaciones de los ultracapacitores como dispositivos electrónicos y sistemas de reserva de energía y UPS poseen un peso ponderado que tiende a un valor de 2, por tanto se considera que el conocimiento que se presenta en Colombia respecto a estas dos (2) aplicaciones está en desarrollo. Para las demás aplicaciones el nivel de conocimiento que se tiene está entre el nivel en desarrollo y el nivel insuficiente, evidenciando que aún existen vacíos importantes en la

implementación del almacenamiento de energía en Colombia; se visualiza la necesidad de realizar un mayor número de investigaciones y estudios, con el fin de tener conocimientos más amplios y desarrollos futuros en la implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores.

7.2.5. Nivel de implementación

Para conocer cuáles aplicaciones de ultracapacitores para el almacenamiento de energía podrían llegar a desarrollarse o implementarse en Colombia, se preguntó a los expertos sobre el nivel de implementación que consideran tendrían las diferentes aplicaciones en el contexto colombiano, las respuestas se evidencian en la Figura 40.

Se observa que las aplicaciones sistemas de reserva de energía y UPS y soporte a las energías renovables tienen un nivel alto de implementación considerado por los expertos, el resto de aplicaciones se encuentran con un nivel medio de implementación.

Nivel de implementación en Colombia de las aplicaciones de los ultracapacitores (%)

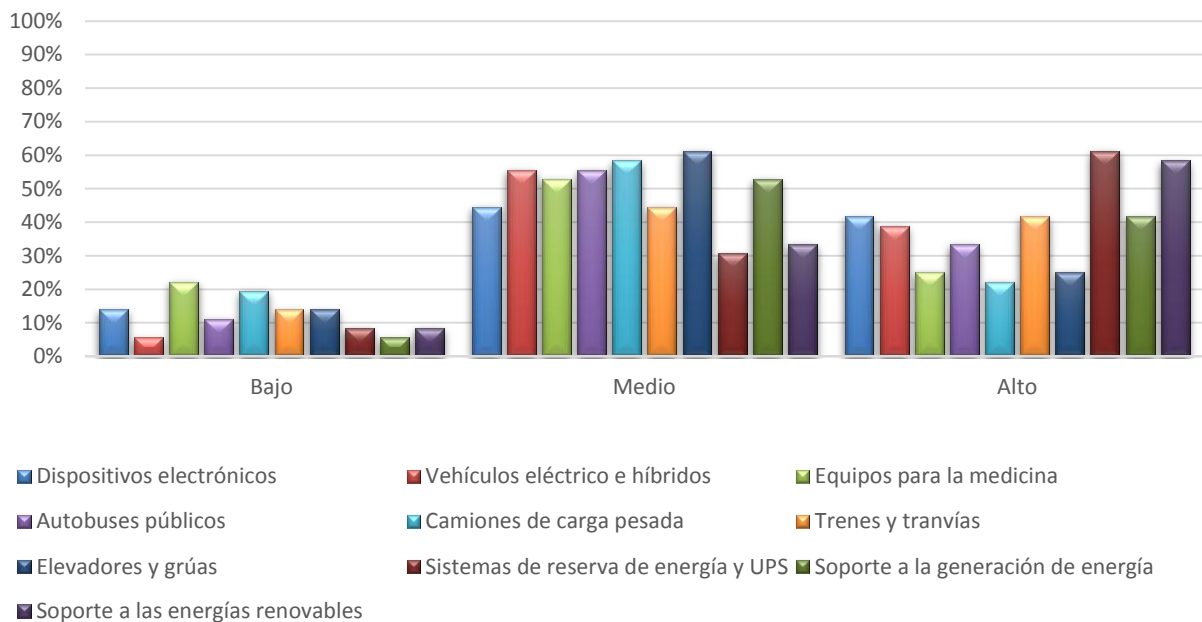


Figura 40. Nivel de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores
Fuente: Elaboración propia

Para analizar el nivel de implementación, se utiliza el método de promedio ponderado, utilizado anteriormente para calificar el nivel de conocimiento. En este caso le asignamos un criterio de 1 para un nivel de Bajo, 2 para Medio y 3 para Alto. Los resultados al realizar el proceso se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Pesos ponderados del nivel de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores

Dispositivos electrónicos	Vehículos eléctrico e híbridos	Equipos para la medicina	Autobuses públicos	Camiones de carga pesada	Trenes y tranvías	Elevadores y grúas	Sistemas de reserva de energía y UPS	Soporte a la generación de energía	Soporte a las energías renovables
2,3	2,3	2,0	2,2	2,0	2,3	2,1	2,5	2,4	2,5

Los pesos ponderados de las aplicaciones de los ultracapacitores para medir el nivel de implementación en Colombia, en su mayoría tienden a aproximarse a un nivel Medio, enmarcado en las aplicaciones para vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos, trenes y tranvías y autobuses para el servicio público. Las aplicaciones para el soporte a las energías renovables y sistemas de reserva de energía tienden a tener un nivel de implementación Alto.

Los expertos consideran que las aplicaciones de sistemas de reserva de energía y soporte a las energías renovables son las que posiblemente pueden desarrollarse e implementarse en mayor proporción para Colombia, debido a los abundantes recursos para estos tipos de generación con los que cuenta el país, a la experiencia adquirida y al mayor conocimiento de su funcionamiento.

7.2.6. Escala temporal

Mediante esta variable se trata de evaluar la opinión que tienen los expertos para la materialización de las diferentes aplicaciones de los ultracapacitores, en un horizonte temporal que está comprendido entre la actualidad y más allá del 2030.

Las aplicaciones con una alta probabilidad de implementación en una escala temporal cercana son los vehículos eléctricos e híbridos y el soporte a la generación de energía, según la opinión de los expertos, tienen una escala temporal de implementación entre el 2021 y 2025. En un horizonte temporal entre 2026 y 2030 estarían contempladas las aplicaciones de equipos para la medicina, trenes y tranvías.

Al igual que en las dos variables anteriores, se utiliza el método del promedio ponderado para definir con una mayor exactitud el horizonte temporal de materialización de las aplicaciones. Para esto se asigna un peso a cada posibilidad de la siguiente manera:

- 1 = Antes de 2020
- 2 = 2021 – 2025
- 3 = 2026 – 2030
- 4 = Más del 2030
- 5 = Nunca

Los resultados del método se muestran en la Tabla 12.

Horizonte temporal de implementación en Colombia de las aplicaciones de los ultracapacitores (%)

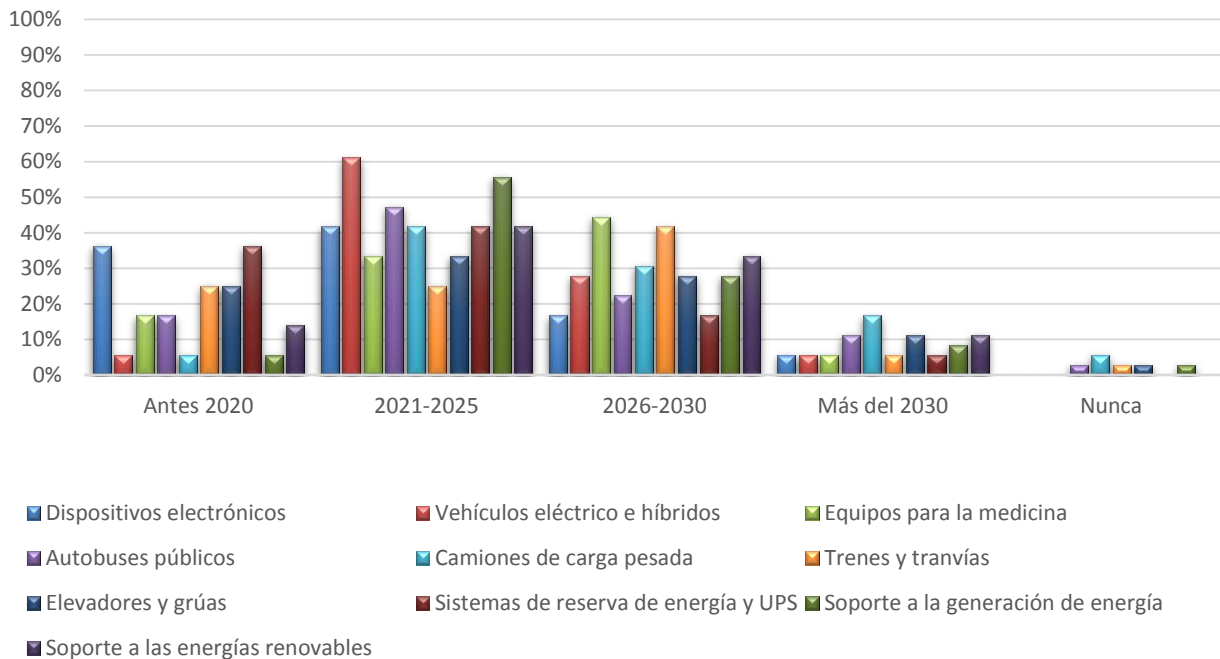


Figura 41. Horizonte temporal de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Pesos ponderados del horizonte temporal de implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores

Dispositivos electrónicos	Vehículos eléctrico e híbridos	Equipos para la medicina	Autobuses públicos	Camiones de carga pesada	Trenes y tranvías	Elevadores y grúas	Sistemas de reserva de energía y UPS	Soporte a la generación de energía	Soporte a las energías renovables
1,9	2,3	2,4	2,4	2,8	2,4	2,3	1,9	2,5	2,4

Los dispositivos electrónicos y los sistemas de reserva de energía son las aplicaciones que tienen un horizonte temporal de materialización más cercano, respecto a la actualidad, ya que son las que presentan valores ponderados de menor valor. La materialización para los camiones de carga pesada estaría comprendida entre 2026 y 2030; las demás aplicaciones poseen una escala temporal de implementación entre 2021 y 2025.

7.3. Análisis de temáticas

El desarrollo e implementación de nuevas aplicaciones de los ultracapacitores en un determinado mercado viene de la mano con el planeamiento de estrategias regulatorias, de mercado, técnicas, entre otras, en búsqueda de que la incursión de estas aplicaciones se presente de una manera

exitosa y cumplan el fin para el cual han sido diseñadas. Encaminados en este sentido, se indagó al grupo de expertos sobre cuáles de las estrategias, previamente seleccionadas, tienen mayor impacto en el desarrollo e implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores en el sector eléctrico colombiano. Los resultados de esta consulta son presentados a continuación.

7.3.1. Estrategias regulatorias, financieras y ambientales

Utilizando el método de los pesos ponderados para observar cuáles de las estrategias tienen mayor impacto en el contexto colombiano se obtienen los resultados mostrados en la

Tabla 13. Un peso ponderado de cinco (5) es equivalente a un fuerte impacto y un peso ponderado de uno (1) equivale a un bajo impacto.

Como se evidencia, las estrategias que se consideran con mayor impacto para promover la implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores son:

- Regulación adecuada para la integración de las fuentes de energías renovables.
- Regulación adecuada para la integración de las tecnologías de almacenamiento de energía.
- Incentivos a la transferencia de tecnologías como: energías renovables, redes inteligentes, generación distribuida y eficiencia energética, mediante exención de impuestos, aranceles y beneficios tributarios.

Estas alternativas presentan valores alrededor de cuatro (4), por lo que su impacto se cataloga como importante. Los expertos consideran que poseer una regulación clara frente a la incorporación de las fuentes de energía renovables y el almacenamiento de energía es la base del desarrollo de las aplicaciones de los ultracapacitores en el país, acompañado de incentivos a la transferencia de tecnología.

Otras estrategias que son consideradas importantes con valores oscilando alrededor de 4 son las siguientes:

- Política de incentivos para la implementación de las fuentes no convencionales de energía
- Política de incentivos para la implementación del vehículo eléctrico
- Programas de difusión de las tecnologías de almacenamiento de energía por medio de congresos, foros, simposio, revistas, comunicación en la web, entre otros.

Aquí los expertos recalcan la relevancia de contar con incentivos tributarios y mecanismos de financiación claros que avalen la incorporación de proyectos donde se utilicen los ultracapacitores en el país. La difusión de las tecnologías de almacenamiento de energía también se considera como un potenciador importante en el desarrollo de las aplicaciones de los ultracapacitores.

Finalmente, los expertos consideran con relevancia media la estrategia:

- Consideraciones ambientales para promover soluciones sostenibles

Tabla 13. Pesos ponderados de las estrategias para la implementación de las aplicaciones

Estrategia	Peso ponderado
Regulación adecuada para la integración de las fuentes de energías renovables	4,2
Política de incentivos para la implementación de las fuentes no convencionales de energía	3,9
Política de incentivos para la implementación del vehículo eléctrico	3,9
Regulación apropiada para el desarrollo de las redes inteligentes	3,6
Regulación adecuada para la integración de las tecnologías de almacenamiento de energía	4,0
Mecanismos financieros que promuevan la implementación o desarrollo de proyectos de eficiencia energética	3,6
Incentivos a la transferencia de tecnologías como: energías renovables, redes inteligentes, generación distribuida y eficiencia energética, mediante exención de impuestos, aranceles y beneficios tributarios	4,0
Consideraciones ambientales para promover soluciones sostenibles	3,3
Programas de difusión de las tecnologías de almacenamiento de energía por medio de congresos, foros, simposio, revistas, comunicación en la web, entre otros	3,7

7.3.2. Consideraciones técnicas

Cuando se implementan soluciones tecnológicas nuevas, es indispensable conocer los aspectos técnicos que podrían impulsar su desarrollo y aquellos que impactarían al sistema de suministro de energía, con el fin de que la penetración de las tecnologías no afecte de manera negativa los sistemas que se poseen actualmente. Para esto se preguntó acerca de algunos aspectos técnicos que poseen relevancia para las aplicaciones de los ultracapacitores. Los resultados al aplicar el método de los pesos ponderados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Pesos ponderados de las consideraciones técnicas de las aplicaciones de los ultracapacitores

Aspectos técnicos	Peso ponderado
Confiabilidad del suministro de energía	4,1
Calidad de la energía	3,9
Reducción de pérdidas técnicas	3,3
Eficiencia energética	3,8

Aspectos técnicos	Peso ponderado
Gestión de la demanda	3,6
Operación y estabilidad del sistema eléctrico colombiano	3,9
Integración de redes inteligentes	3,9
Implementación del vehículo eléctrico	3,9
Implementación de energías renovables en Zonas No Interconectadas	3,7
Desarrollo de proyectos de micro-redes	3,7
Generación con fuentes no convencionales de energía	4,1

Los expertos consideran que la incorporación de aplicaciones de los ultracapacitores podría aportar importantes avances en los siguientes aspectos técnicos presentes en el sector:

- Confiabilidad del suministro de energía
- Generación con fuentes no convencionales de energía
- Operación y estabilidad del sistema eléctrico colombiano
- Integración de redes inteligentes

El aporte de las tecnologías de almacenamiento de energía mediante ultracapacitores a la confiabilidad del suministro de energía presenta alta importancia debido a la posibilidad que presenta para reforzar la red de distribución ante posibles contingencias en el sistema eléctrico de potencia. Los ultracapacitores se presentarían como apoyo para tomar parte de la carga garantizando que el suministro de energía se mantenga estable y los usuarios no se vean afectados por posibles interrupciones. Este tema toma mayor relevancia cuando se atienden cargas sensibles como hospitales y bases militares, donde se debe garantizar una generación de energía de respaldo en todo momento ante posibles fallas del sistema central.

La generación con fuentes no convencionales de energía, en particular las fuentes renovables, permite aprovechar recursos que minimizan el impacto que la generación de energía puede ocasionar sobre el medio ambiente. Si además, se entiende que estos recursos toman importancia para generación de energía dependiendo de la ubicación territorial, los ultracapacitores se presentan como la mejor opción para disminuir su intermitencia y que éstas sean aprovechadas debido a su mayor flexibilidad y a la posibilidad de repartir la energía generada cerca de los puntos de consumo.

En el tema de operación y estabilidad del sistemas eléctrico colombiano las aplicaciones de los ultracapacitores podrían entrar a dar soporte y de esta manera disminuir los picos en la curva de demanda energética en momentos donde el consumo se maximice, evitando sobrecargas en el sistema de generación central. Esto estabilizaría la curva de demanda en el momento en que la

generación distribuida entregue energía eléctrica a la red cuando se presenten estos excesos de carga.

Con valores cercanos a cuatro (4) los siguientes aspectos también son considerados como importantes para la implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores:

- Implementación del vehículo eléctrico
- Calidad de la energía
- Eficiencia energética

Los expertos ven con menor relevancia el hecho de que con las aplicaciones de los ultracapacitores se puedan atacar problemas referentes a las pérdidas técnicas de transmisión y distribución donde el peso ponderado obtenido es de 3,3.

7.3.3. Consideraciones económicas

Al igual que las estrategias y los aspectos técnicos, los aspectos económicos son un tema de gran importancia, ya que se debe asegurar una viabilidad económica, con el fin de que las tecnologías de almacenamiento de energías, especialmente los ultracapacitores, sean competitivas en el mercado.

De la Tabla 15 se puede observar que hay tres aspectos económicos de mayor importancia, entre los que se consideraron, con un peso ponderado superior a cuatro (4). Estos temas son: Fortalecimiento de capacidades en investigación y desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía, Costos económicos en la implementación o desarrollo de los ultracapacitores e Inversión en investigación y desarrollo.

Tabla 15. Pesos ponderados de los aspectos económicos

Aspectos económicos	Peso ponderado
Crecimiento de la demanda de energía en el país	3,2
Incremento de la inversión extranjera	2,7
Inversión en investigación y desarrollo	4,2
Costos económicos en la implementación o desarrollo de los ultracapacitores	4,3
Fortalecimiento de capacidades en investigación y desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía	4,5

Uno de los principales factores para la penetración de los ultracapacitores es el fortalecimiento de capacidades en investigación y desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía. Esto impulsaría fuertemente el conocimiento asociado a estas tecnologías, permitiendo la apropiación de las mismas.

Los expertos consideran que mejorar el tema de costos de implementación y desarrollo de los ultracapacitores es un indicativo en el cual se deben focalizar esfuerzos. Esto se puede lograr potenciando el conocimiento de las tecnologías de almacenamiento de energía, masificando su fabricación y su implementación. Ligado con lo anterior, también toma importancia el aspecto de fortalecer las capacidades en investigación y desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía para aumentar el conocimiento que se tiene en el país frente a estos tipos de almacenamiento en aspectos técnicos, financieros y ambientales.

Con menor relevancia pero con un peso ponderado elevado, el crecimiento de la demanda de energía en el país es un tema que afecta directamente, según los expertos, la posibilidad de acelerar la implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores en el territorio colombiano.

El incremento de la inversión extranjera no se evidencia como un factor de gran importancia para condicionar la implementación de los ultracapacitores en el país.

7.4. Opiniones de expertos

En la consulta se ha dispuesto un espacio para que los expertos aporten opiniones que consideran importantes sobre las aplicaciones de los ultracapacitores. En este espacio se han mencionado análisis y estrategias de mucha importancia que son presentadas a continuación.

- La principal estrategia es la implementación de proyectos piloto y laboratorios de investigación (investigaciones de largo plazo y no micro-investigaciones). Para ello se requiere una activa participación del sector eléctrico.
- Regulación en la renovación de equipos para las empresas distribuidoras y transportadoras de energía eléctrica.
- Fortalecimiento de los sistemas de transporte eléctrico masivo y regulación secundaria de frecuencia.
- Proyectos universidad-empresa-estado aplicados a los sistemas de transporte masivo de mediana capacidad en Colombia.
- Las aplicaciones de la tecnología de ultracapacitores varían dependiendo del eslabón de la cadena de producción de energía eléctrica considerado (generación, transmisión, distribución). Para el caso de Colombia, es importante definir en cada uno de esos eslabones cuáles son los problemas técnicos que esa tecnología podría resolver y cuáles son sus costos comparados con las soluciones actuales para priorizar los esfuerzos. Por ejemplo, en la literatura se encuentran propuestas para usar ultracapacitores en el servicio de regulación secundaria de frecuencia.
- Considerando que el costo de los ultracapacitores constituye una barrera para la penetración de la tecnología, la estrategia debería orientarse al desarrollo local de dicha tecnología.
- Aprobar e implementar el Mapa de Ruta para el Sistema Nacional de Redes Inteligentes.

- Una estrategia importante consiste en la creación de un marco regulatorio claro, que propicie la libre competencia entre las diferentes tecnologías, en igualdad de condiciones, y que brinde confianza a los inversionistas. Este marco regulatorio debe abarcar aspectos técnicos, económicos y ambientales.
- Elaborar estrategias a nivel nacional, provincial, regional urbana y rural (en conjunto de energías renovables - eficiencia energética - conversión eficiente de energía - almacenamiento de energía) para todos los sectores de la economía basados en las fuentes autóctonas de energía renovables.
- Una de las estrategias más importantes es iniciar un proceso de implementación de sistemas de demostración y la difusión de sus resultados (técnicos, académicos, económicos, sociales y ambientales) de tal manera que se demuestre la viabilidad de la implementación de proyectos sostenibles con tecnologías de almacenamiento de energía.

8. LÍNEAS DE ACCIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES

Las líneas de acción van encaminadas a llevar a las tecnologías de almacenamiento de energía específicamente el ultracapacitor hacia un escenario deseable, donde las aplicaciones de este sean implementadas en el territorio colombiano. Con lo que se pueden obtener herramientas para tomar decisiones sobre las que posibilitarían las tecnologías y aplicaciones se implementen y desarrollen en Colombia.

Debido a que el impulso a la implementación de los ultracapacitores no posee una única solución, es por esto que se aborda de manera estratégica y se dan varias alternativas en los lineamientos que se deben seguir para una óptima respuesta de todos los actores que se ven directamente afectados por la penetración del almacenamiento de energía en Colombia.

A continuación, se procede a presentar líneas de acción a considerar para la implementación de los ultracapacitores en Colombia y que van encaminados con las consideraciones realizadas en el juicio a expertos de acuerdo a las aplicaciones que tienen mayor viabilidad de ser implementadas o desarrolladas en Colombia.

Tabla 16. Líneas de acción para la implementación de los ultracapacitores

Objetivo	Meta	Línea de acción
Estimular el uso de paneles fotovoltaicos en el país.	Tener como mínimo una capacidad de generación de 800 MW a nivel nacional.	Promover especializaciones y maestrías con investigación en fuentes renovables, tecnologías limpias de transformación de energía, sistemas y aplicaciones pasivas de FNCE, contribuyendo a la consolidación de capacidades de vigilancia, asimilación y negociación de tecnologías.
Aumentar la cantidad de proyectos	Lograr la aprobación de recursos para mínimo 10 proyectos por	Establecer y poner en marcha un comité de alto nivel

Objetivo	Meta	Línea de acción
financiados cuyo objeto sea la instalación y operación de plantas de energía eólica.	año, cuyo objeto sea la instalación y operación de plantas de aerogeneradores.	interinstitucional entre los ministerios de minas y energía, transporte, ambiente y agricultura, el cual esté enfocado a la gestión de recursos y promoción de incentivos para la instalación de sistemas de generación eólica.
Impulsar la penetración de los vehículos eléctricos al país. Apropriado para la implementación y operación de la tecnología.	Incremento en un 20% de proyectos pilotos en movilidad eléctrica utilizando como sistema de almacenamiento de energía ultracapacitores.	Fortalecer los estudios, investigaciones y proyectos pilotos sobre vehículos eléctricos que utilicen ultracapacitores como sistema de almacenamiento de energía.
Promover el uso de ultracapacitores en sistemas convencionales de energía y de generación distribuida.	Aumento de un 30% en la confiabilidad de los sistemas de generación con FNCE disminuyendo su intermitencia, debido a los beneficios que proveen la implementación de ultracapacitores en los sistemas de generación, como solar y eólico.	Apropiar los ultracapacitores para su uso en las fuentes no convencionales de energía y generación distribuida.
Utilizar ultracapacitores para almacenar energía, contribuyendo a la eficiencia energética en industrias.	Las industrias serán 20% más eficientes energéticamente, con el uso de ultracapacitores para almacenar la energía que se genera en sus procesos, por tanto se comercializará y se producirá un mayor número de ultracapacitores.	Mejorar de sistemas energéticos industriales a partir de ultracapacitores con el fin de aprovechar la energía que se desprende de los procesos realizados, almacenándola para después volverla a reutilizar.
Incentivar el uso de ultracapacitores, mediante la formulación de normatividad dirigida a potenciar los VE.	Disponer de un mínimo de 10 normas y guías técnicas del ICONTEC en conjunto.	Formular normatividad que incentiven el uso de vehículos eléctricos.
Promover el uso de la generación distribuida mediante incentivos que propicien interés por parte de la comunidad científica e industrial.	Disponer de estímulos tributarios, exención de aranceles, entre otros; que propicien la importación de tecnologías favorables a la generación distribuida y con esto se promoverá la implementación de	Incentivar el uso de tecnologías de generación distribuida para la producción de electricidad.

Objetivo	Meta	Línea de acción
	ultracapacitores.	
Fomentar el uso de sistemas eólicos o solares para el suministro de energía a zonas no interconectadas.	Aumentar la cobertura de energía eléctrica en zonas no interconectadas a un valor del 98%.	Promover el suministro de energía a zonas no interconectadas, mediante sistemas eólicos o solares.
Fortalecer la legislación y regulación vigente para las tecnologías que utilicen fuentes no convencionales de energía.	Lograr que la regulación y legislación para los sistemas de generación con fuentes no convencionales de energía se aumente en un 150% con respecto al valor actual.	Definir y publicar los lineamientos y regulación correspondientes a los puntos de la ley 1715 de 2014 que abarcan el tema de generación con FNCE, además de fortalecer la regulación y legislación actual para concebir orden y estandarización en la implementación de este tipo de soluciones.
Aumentar el apoyo financiero para mitigar los costos asociados al mantenimiento y sostenibilidad de las soluciones de generación distribuida en sistemas de generación híbridos.	Evitar el desabastecimiento energético en zonas donde los costos de operación y mantenimiento de este tipo de sistemas ocasionan que la prestación del servicio no sea viable financieramente.	Establecer mecanismos de financiación con recursos públicos que permitan amortizar y disminuir los costos asociados a la adquisición del insumo y al mantenimiento del sistema de almacenamiento de energía cuando este haga parte de un sistema de generación híbrido como alternativa de respaldo.
Ampliar el portafolio de empresas que brinden soluciones energéticas integradas con ultracapacitores.	Aumento en un 30% de proveedores de soluciones energéticas que utilicen ultracapacitores.	Fortalecer las competencias laborales en la formación técnica y tecnológica en aquellos comercializadores que ofrezcan soluciones de almacenamiento de energía.
Fortalecer las capacidades en investigación y desarrollo existentes de toda la comunidad científica e industrial.	Se obtendrá un amplio conocimiento en sistemas de almacenamiento por ultracapacitores, mediante la capacitación a través de consultores internacionales expertos en la temática.	Crear un programa de capacitación para la comunidad científica en general que permita aumentar las capacidades en investigación y desarrollo que se poseen actualmente.

9. EVALUACIÓN DE COSTOS DE LAS APLICACIONES DE LOS ULTRACAPACITORES

El costo es un desembolso en efectivo o en especie realizado en el pasado, en el presente, en el futuro o en forma virtual. Para el presente caso se denominará a los costos realizados en el pasado costos hundidos, ya que no tienen efecto en la evaluación, los costos en el presente se denominan inversión y los costos futuros son llamados costos de oportunidad (Baca Urbina, 1995).

La evaluación de los costos de la implementación de ultracapacitores en sus diferentes aplicaciones tiene como objetivo cuantificar cuál es la inversión a realizar en cada caso.

La inversión inicial es aquella que comprende la adquisición de todos los activos fijos y los intangibles. Los activos fijos son todos aquellos que se pueden tocar o que son físicos y los intangibles son todos aquellos que son necesarios para el funcionamiento del sistema, y que incluyen: diseños, transferencia de tecnología, gastos pre-operativos, gastos de instalación y puesta en marcha, contratos, estudios de ingeniería, entre otros (Baca Urbina, 1995).

A continuación se presentan los costos de inversión del ultracapacitor dependiendo de la aplicación para la cual fue diseñado.

- **Dispositivos electrónicos portables**

Tabla 17. Costos asociados a los dispositivos electrónicos portables

Fuente: www.tecategroup.com/products/

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Tecate Group	TPLE-5.0/10X20F	2,3	5	2,25	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPLE-10/10X30F	2,3	10	2,35	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPLE-22/12X35F	2,3	22	4,9	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPLE-25/16X26F	2,3	25	4,9	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPLE-50/18X40F	2,3	50	6,75	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPLE-70/18X45F	2,3	70	8	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPLE-100/22X45F	2,3	100	9,35	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPL-50/18X40F	2,7	50	5	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPL-100/18X60F	2,7	100	8,5	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	TPLS-300/35X50F	2,7	300	24	Dispositivos electrónicos portables

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Tecate Group	TPLS-400/35X60F	2,7	400	28	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	PBLLE-2.5/4.6	4,6	2,5	11,55	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	PBLE-12.5/4.6	4,6	12,5	17,85	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	PC10 (108647)	2,5	10	27,5	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	BCAP0150-P270	2,7	150	14,75	Dispositivos electrónicos portables
Maxwell	BCAP0350-E270-T11	2,7	350	10,75	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	PBM-1500/5.4,1x2	5,4	1500	260	Dispositivos electrónicos portables
Tecate Group	PBLS-12.5/10.8	10,8	12,5	49,5	Dispositivos electrónicos portables

- **Equipos para la medicina**

Tabla 18. Costos asociados a los equipos para la medicina
Fuente: www.tecategroup.com/products/

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Tecate Group	PBLS-16.66/8.1	8,1	16,6	45	Equipos para la medicina
Tecate Group	PBLS-12.5/10.8	10,8	12,5	49,5	Equipos para la medicina

- **Autobuses de servicio público**

Tabla 19. Costos asociados a los autobuses de servicio público
Fuente: www.tecategroup.com/products/

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Maxwell	BMOD0500-P016-B02	16,2	500	595	Autobuses públicos
Maxwell	BMOD0063-P125-B04	125	63	3.050	Autobuses públicos
Maxwell	BMOD0130-P056-B06	56	130	1.950	Autobuses públicos
Maxwell	BMOD0083-P048-B05	48,6	80	1.340	Autobuses públicos
Maxwell	BMOD0165-P048-B15	48,6	165	1.450	Autobuses públicos

- **Camiones de carga pesada**

Tabla 20. Costos asociados a los camiones de carga pesada
Fuente: www.tecategroup.com/products/ y www.mouser.com

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Tecate Group	PBD-58/16.2M	16,2	58	195	Camiones de carga pesada
Maxwell	BMOD0094-P075-B02	75	94	2.962,73	Camiones de carga pesada
Maxwell	BMOD0063-P125-B04	125	63	3.050	Camiones de carga pesada
Tecate Group	PBM-125/64.8,3x9	64,8	125	2.450	Camiones de carga pesada
Maxwell	BMOD0130-P056-B07	56	130	1.950	Camiones de carga pesada
Maxwell	BMOD0083-P048-B06	48,6	80	1.340	Camiones de carga pesada
Maxwell	BMOD0165-P048-B16	48,6	165	1.450	Camiones de carga pesada

- **Trenes y tranvías**

Tabla 21. Costos asociados a los trenes y tranvías
Fuente: www.tecategroup.com/products/ y www.mouser.com

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Maxwell	BCAP0650-P270-K04	2,7	650	63	Trenes y tranvías
Maxwell	BCAP3000-P270-K04	2,7	3000	59	Trenes y tranvías
Maxwell	BCAP3400-P285-K04	2,85	3400	70,75	Trenes y tranvías
Maxwell	BMOD0094-P075-B02	75	94	2.962,73	Trenes y tranvías
Maxwell	BMOD0063-P125-B04	125	63	3.050	Trenes y tranvías
Tecate Group	PBM-166/48.6,3x7	48,6	166	1.800	Trenes y tranvías
Maxwell	BMOD0083-P048-B02	48,6	80	1.340	Trenes y tranvías
Maxwell	BMOD0165-P048-B10	48,6	165	1.450	Trenes y tranvías
KEMET	S01PM1205R080AU813	80	12	1.246,83	Trenes y tranvías

- **Elevadores y grúas**

Tabla 22. Costos asociados a los elevadores y grúas
Fuente: www.tecategroup.com/products/ y www.mouser.com

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Maxwell	BCAP3400-P285-K04	2,85	3400	70,75	Elevadores y grúas
Maxwell	BMOD0500-P016-B02	16,2	500	595	Elevadores y grúas
Tecate Group	PBM-125/64.8,3x8	64,8	125	2.450	Elevadores y grúas
Maxwell	BMOD0130-P056-B04	56	130	1.950	Elevadores y grúas
Tecate Group	PBM-166/48.6,3x6	48,6	166	1.800	Elevadores y grúas
Maxwell	BMOD0083-P048-B03	48,6	80	1.340	Elevadores y grúas
Maxwell	BMOD0165-P048-B11	48,6	165	1.450	Elevadores y grúas

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
KEMET	S01PM1205R080AU812	80	12	1.246,83	Elevadores y grúas
Maxwell	BMOD0006 E160 B03	160	5,8	1.170,19	Elevadores y grúas

- **Sistemas de reserva de energía y UPS**

Tabla 23. Costos asociados a los sistemas de reserva de energía y UPS

Fuente: www.tecategroup.com/products/ y www.mouser.com

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Maxwell	BCAP0350-E270-T11	2,7	350	10,75	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BCAP3400-P285-K04	2,85	3400	70,75	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BMOD0500-P016-B02	16,2	500	595	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BMOD0094-P075-B02	75	94	2.962,73	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BMOD0130-P056-B03	56	130	1.950	Sistemas de reserva de energía y UPS
Tecate Group	PBM-166/48.6,3x8	48,6	166	1.800	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BMOD0083-P048-B04	48,6	80	1.340	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BMOD0165-P048-B12	48,6	165	1.450	Sistemas de reserva de energía y UPS
EATON	XLM-62R1137-R	62,1	130	1.396,5	Sistemas de reserva de energía y UPS
KEMET	S01PM1205R080AU811	80	12	1.246,83	Sistemas de reserva de energía y UPS
IOXUS	iMOD080V012P1M-02A	80	12	349,44	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BMOD0006 E160 B04	160	5,8	1.170,19	Sistemas de reserva de energía y UPS
Maxwell	BMOD0094 P075 B03	94	75	2.962,73	Sistemas de reserva de energía y UPS

- **Soporte a la generación de energía convencional**

Tabla 24. Costos asociados al soporte de generación de energía convencional

Fuente: www.tecategroup.com/products/ y www.mouser.com

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Maxwell	BCAP0650-P270-K04	2,7	650	63	Soporte a la

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
					generación de energía
Maxwell	BCAP3000-P270-K04	2,7	3000	59	Soporte a la generación de energía
Maxwell	BMOD0094-P075-B02	75	94	2.962,73	Soporte a la generación de energía
Tecate Group	PBM-125/64.8,3x10	64,8	125	2.450	Soporte a la generación de energía
Maxwell	BMOD0083-P048-B05	48,6	80	1.340	Soporte a la generación de energía
Maxwell	BMOD0165-P048-B13	48,6	165	1.450	Soporte a la generación de energía
EATON	XLM-62R1137-R	62,1	130	1.396,5	Soporte a la generación de energía
IOXUS	iMOD080V012P1M-02A	80	12	349,44	Soporte a la generación de energía

- **Soporte a las energías renovables**

Tabla 25. Costos asociados al soporte a las energías renovables

Fuente: www.tecategroup.com/products/ y www.mouser.com

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Maxwell	BCAP0350-E270-T11	2,7	350	10,75	Soporte a las energías renovables
Maxwell	BCAP3400-P285-K04	2,85	3400	70,75	Soporte a las energías renovables
Tecate Group	PBD-58/16.2M	16,2	58	195	Soporte a las energías renovables
Maxwell	BMOD0500-P016-B02	16,2	500	595	Soporte a las energías renovables
Maxwell	BMOD0094-P075-B02	75	94	2.962,73	Soporte a las energías renovables
Maxwell	BMOD0165-P048-B14	48,6	165	1.450	Soporte a las energías renovables
EATON	XLM-62R1137-R	62,1	130	1.396,5	Soporte a las energías renovables
KEMET	S01PM1205R080AU809	80	12	1.246,83	Soporte a las energías renovables
IOXUS	iMOD080V012P1M-02A	80	12	349,44	Soporte a las energías renovables
Maxwell	BMOD0006 E160 B02	160	5,8	1.170,19	Soporte a las energías renovables
Maxwell	BMOD0094 P075 B02	94	75	2.962,73	Soporte a las

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
					energías renovables

- Vehículos eléctricos e híbridos

Tabla 26. Costos asociados a los vehículos eléctricos e híbridos

Fuente: www.tecategroup.com/products/ y www.mouser.com

Marca	Referencia	Voltaje (V)	Faradios (F)	Precio (USD)	Aplicación
Maxwell	BCAP3400-P285-K04	2,85	3400	70,75	Vehículos eléctricos e híbridos
Maxwell	BMOD0500-P016-B02	16,2	500	595	Vehículos eléctricos e híbridos
Maxwell	BMOD0094-P075-B02	75	94	2.962,73	Vehículos eléctricos e híbridos
Tecate Group	PBM-125/64.8,3x9	64,8	125	2.450	Vehículos eléctricos e híbridos
Maxwell	BMOD0130-P056-B05	56	130	1.950	Vehículos eléctricos e híbridos
Maxwell	BMOD0083-P048-B01	48,6	80	1.340	Vehículos eléctricos e híbridos
Maxwell	BMOD0165-P048-B09	48,6	165	1.450	Vehículos eléctricos e híbridos
KEMET	S01PM1205R080AU810	80	12	1.246,83	Vehículos eléctricos e híbridos

Como ejemplo, se tomó en cuenta el caso de implementación de ultracapacitores en el Metro de Medellín, proyecto realizado entre la Universidad Pontificia Bolivariana y Metro de Medellín, con apoyo de Colciencias. Para efectos del presente trabajo, solo se tomarán en cuenta los costos de inversión inicial total de los activos fijos.

Tabla 27. Costos de implementación de un sistema de ultracapacitores en el Metro de Medellín

Fuente: Información suministrada por el Doctor Andrés Emiro Diez en relación al proyecto de implementación de ultracapacitores realizado entre UPB y Metro de Medellín, con apoyo de Colciencias.

Costos de implementación del ultracapacitor en el Metro de Medellín	
Elemento	Costo
8 módulos de ultracapacitor (63F, 115 Voltios)	USD 6.500 (cada módulo)
Convertidor DC-DC	USD 29.400 (Aprox)
Relé de protección	USD 14.700 (Aprox)
Bobina IGBT, tarjetas electrónicas de control, interruptor, mano de obra, personal, imprevistos, salidas de campo, transporte, viajes y viáticos, bibliografía, servicios tecnológicos y otros gastos varios.	USD 203.900 (Aprox)
TOTAL	USD 300.000 (Aprox)

La Tabla 27 presenta los costos de la implementación de un sistema de ultracapacitores en el Metro de Medellín. Esta implementación tuvo unos costos de alrededor de USD 300.000, lo que da cuenta que la tecnología de almacenamiento de energía por ultracapacitores aún se encuentra en estado de desarrollo, debido a que sus costos de implementación son elevados y en la actualidad y para el caso colombiano es difícil que las industrias soporten financieramente estas inversiones.

10. CONCLUSIONES

Las tecnologías de almacenamiento de energía específicamente los ultracapacitores son una tendencia que actualmente se encuentra creciendo mundialmente, se tienen registros desde el año 1991 y a partir del 2004 se viene incrementando con mayor participación de otras naciones interesadas en la temática, debido a que las tecnologías de almacenamiento de energía suponen una solución a problemáticas medioambientales, técnicas y de eficiencia del actual sistema eléctrico colombiano.

En general se considera que las aplicaciones de mayor viabilidad en el contexto colombiano, son los sistemas de reversa de energía y el soporte a las energías renovables. Debido a las experiencias que se han tenido con respecto a esas aplicaciones y a que los ultracapacitores son un tema que se ha estudiado con gran interés, ya que suponen un gran avance para el desarrollo de los sistemas de generación de energía a través de energías renovables.

En el desarrollo e implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores en Colombia, los dispositivos electrónicos y los sistemas de reserva de energía, son los que tienen un horizonte más cercano de implementación, dado entre los años de 2021 y 2025. Igualmente, los vehículos eléctricos, el soporte a la generación de energía y el soporte a las energías renovables tienen un horizonte temporal de implementación entre 2021 y 2025, pero un poco mayor en comparación con las dos aplicaciones mencionadas inicialmente.

En general, se observa que las aplicaciones de los ultracapacitores se encuentran en un escenario que requiere de mucho esfuerzo para que se presenten su implementación. Los puntos de más interés que podrían llegar a impulsar o frenar la implementación de las aplicaciones son: falta de una regulación adecuada para la implementación de estas tecnologías, pocos incentivos para la industria y empresarios que utilicen almacenamiento de energía en sus procesos, desconocimiento en el funcionamiento y desempeño, poca inversión financiera, ya que los costos que requieren las tecnologías son altos, las aplicaciones de vehículos eléctricos, generación con fuentes no convencionales de energía y generación distribuida; por tanto, son estos tópicos que requieren de mayor atención con miras a una óptimo desarrollo industrial y económico en Colombia.

Las consideraciones ambientales no son muy tenidas en cuenta a la hora de pensar en el desarrollo de nuevas tecnologías en el país, se priorizan sobre aspectos alternos como los técnicos, financieros, etc.

En Colombia las investigaciones realizadas hasta el momento en temas de almacenamiento energético especialmente los ultracapacitores son muy pocas. Se requiere de mayor inversión en investigación y desarrollo, además de la implementación de pruebas piloto que permitan obtener unas bases de conocimiento sólidas. De esta manera se adquiere conocimiento suficiente con el cual poder tomar decisiones para futuros modelos de negocios.

Los principales factores que impulsarían la implementación de las aplicaciones serían políticas públicas que incentiven el uso de vehículos eléctricos, la generación distribuida, fuentes no convencionales de energía y programas de uso eficiente de los recursos energéticos.

El fortalecimiento de las capacidades y la inversión en investigación y desarrollo, serían factores aceleradores en el proceso de desarrollar conocimiento y apropiación de los ultracapacitores, por lo que llegarían los sistemas de almacenamiento de energía a un punto de crecimiento ideal en un horizonte temporal más corto.

11. BIBLIOGRAFÍA

Baca Urbina, G. (1995). Evaluación de proyectos. *Editorial Mc Graw Hill*. Retrieved from

[http://www.sidalc.net/cgi-](http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=SIDINA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=002034)

[bin/wxis.exe/?IsisScript=SIDINA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=002034](http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=SIDINA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=002034)

Burke, A. (2000). Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources*, 91(1), 37–50.

Burke, A. (2010). Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 34(2), 133–151.

Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (2014, January 23). Resolución 004 de 2014.

Congreso de Colombia. Ley 697 (2001). Retrieved from http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/reglamentacion/ley_697_de_2001.pdf

Congreso de Colombia. Ley 788 (2002). Retrieved from <http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/Ley%20788%20de%202002.pdf>

Congreso de Colombia. (2011, June 6). LEY 1450 DE 2011.

Congreso de Colombia. Ley 1715 (2014). Retrieved from <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY%201715%20DEL%202013%20DE%20MAYO%20DE%202014.pdf>

Congreso de Colombia. (2014b, May 13). Ley 1715 de 2014.

Congreso de la Republica. (2013, July 16). LEY 1665 DE 2013.

- Irizar, P. E., Cuadrado, M. V., & Zubiri, E. I. (2012). *Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Retrieved from <http://4dlab.info/energia/energia-almacenar-sistemas-de-almacenamiento-de-energia-embarcados-en-los-trenes.pdf>
- Killer, A., Armstorfer, A., Díez, A. E., & Biechl, H. (2012). Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems. In *Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS), 2012 IEEE Colombian* (pp. 1–6). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6336687
- M.A. Guerrero, E. Romero, F. Barrero, M. I. Milanés, E. González. (n.d.). Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems. Power Electronics & Electric Systems (PE&ES).
- Maxwell Technologies. (2015). Retrieved from <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/>
- Miller, J. R., & Simon, P. (2008). Fundamentals of electrochemical capacitor design and operation. *Electrochemical Society Interface*, 17(1), 31–32.
- Ministerio de Minas y Energía. (2006, May 26). RESOLUCIÓN NUMERO 180609 DE 26 DE MAYO DE 2006.
- Nesscap Ultracapacitors. (2015). Nesscap Ultracapacitors. Retrieved from http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/applications/market_overview.jsp
- Schindall, J. (2007). The charge of the ultracapacitors. *Spectrum, IEEE*, 44(11), 42–46.
- Schultz, L. I., & Querques, N. P. (2014). Tracing the ultracapacitor commercialization pathway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1119–1126.

Smith, S. C., & Sr, P. K. Sen. (2008). Ultracapacitors and energy storage: Applications in electrical power system. In *Power Symposium, 2008. NAPS'08. 40th North American* (pp. 1–6). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5307299

Tecate Group. (2010). What is an Ultracapacitor?

Tenorio Chango, C. F., & Vallejo Aguirre, N. J. (2010). Estudio, dimensionamiento y aplicaciones para el uso de ultracapacitores en el arranque de un motor asíncrono de 2HP, como respaldo al banco de baterías del prototipo de un vehículo híbrido realizado por el Ministerio de electricidad y energía renovable.

ANEXO 1: ESTRUCTURA ENCUESTA

OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES EN APLICACIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO



En el marco del proyecto de grado "OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES EN APLICACIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO" para optar por el título de Especialista en Sistemas de Transmisión y Distribución de Energía de la Universidad Pontificia Bolivariana -UPB, se ha diseñado esta encuesta con el fin de identificar oportunidades de implementación de ultracapacitores en aplicaciones del sector eléctrico en Colombia.

Con los resultados de la encuesta se busca establecer aquellas aplicaciones de los ultracapacitores con mayor oportunidad de implementación en el sector eléctrico colombiano, identificando los aspectos fundamentales en los que se deberán tomar acciones para conseguir su materialización.

La información proporcionada en la encuesta es totalmente confidencial, los datos recogidos se analizarán y se procederá a la comunicación de los resultados generales a quienes hayan diligenciado la encuesta.

Cargar encuesta sin terminar

Siguiente ▶

Salir y borrar la encuesta

OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES EN APLICACIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO



0%
100%

Información general

• Nombre

• Institución o Empresa

• Teléfono

• País

• Ciudad

• Correo Electrónico

• ¿Cuál es su nivel de conocimiento respecto a los diferentes temas de almacenamiento de energía, específicamente los ultracapacitores?
Seleccione una de las siguientes opciones

- Ninguno
 Bajo - Medio
 Medio - Alto
 Alto

Continuar después

◀ Anterior

Siguiente ▶

Salir y borrar la encuesta

OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES EN APLICACIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO

0%
100%

Tipos de Aplicaciones de los Ultracapacitores

En su opinión, ¿Cuál es el nivel de conocimiento que Colombia posee respecto a las siguientes aplicaciones de los ultracapacitores?

	De punta	En desarrollo	Insuficiente
Dispositivos electrónicos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vehículos híbridos y eléctricos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Equipos para la medicina	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autobuses públicos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Camiones de carga pesada	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trenes y tranvías	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elevadores y grúas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sistemas de reserva de energía y UPS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Soporte a la generación de energía	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Soporte a la intermitencia de las energías renovables	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En un futuro, ¿Cuál cree que sería el nivel de implementación esperado para los siguientes tipos de aplicaciones de los ultracapacitores en el sector eléctrico colombiano?

	Alto	Medio	Bajo
Dispositivos electrónicos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vehículos híbridos y eléctricos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Equipos para la medicina	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autobuses públicos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Camiones de carga pesada	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trenes y tranvías	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elevadores y grúas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sistemas de reserva de energía y UPS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Soporte a la generación de energía	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Soporte a la intermitencia de las energías renovables	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

¿Cuál cree usted que puede ser la escala temporal de implementación de cada una de las siguientes aplicaciones de los ultracapacitores en el sector eléctrico colombiano?

	Antes 2020	2021-2025	2026-2030	Más del 2030	Nunca
Dispositivos electrónicos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vehículos híbridos y eléctricos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Equipos para la medicina	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autobuses públicos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Camiones de carga pesada	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trenes y tranvías	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elevadores y grúas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sistemas de reserva de energía y UPS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Soporte a la generación de energía	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Soporte a la intermitencia de las energías renovables	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Continuar después

Anterior

Siguiente

Salir y borrar la encuesta

OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES EN APLICACIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO

0%
100%

Aspectos Claves

* **En el desarrollo e implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores en el sector eléctrico colombiano ¿Cuál es el nivel de impacto que considera poseen las siguientes estrategias?**

(Seleccione de una escala de 1 a 5, donde 5 es alto nivel de impacto y 1 es bajo nivel de impacto)

	Nivel de impacto
Regulación adecuada para la integración de las fuentes no convencionales de energía	...
Política de incentivos para la implementación de las fuentes no convencionales de energía	...
Política de incentivos para la implementación del vehículo eléctrico	...
Regulación apropiada para el desarrollo de las redes inteligentes	...
Regulación adecuada para la integración de las tecnologías de almacenamiento de energía	...
Mecanismos financieros que promuevan la implementación o desarrollo de proyectos de eficiencia energética	...
Incentivos a la transferencia de tecnologías como: energías renovables, redes inteligentes, generación distribuida y eficiencia energética, mediante exención de impuestos, aranceles y beneficios tributarios	...
Consideraciones ambientales para promover soluciones sostenibles	...
Programas de difusión de las tecnologías de almacenamiento de energía por medio de congresos, foros, simposio, revistas, comunicación en la web, entre otros	...

* **En el desarrollo e implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores en el sector eléctrico colombiano ¿cuál es el nivel de relevancia de los siguientes aspectos técnicos?**

(Seleccione de una escala de 1 a 5, donde 5 es alto nivel de relevancia y 1 es bajo nivel de relevancia)

	Nivel de relevancia
Confiabilidad del suministro de energía	...
Calidad de la energía	...
Reducción de pérdidas técnicas	...
Eficiencia energética	...
Gestión de la demanda	...
Operación y estabilidad del sistema eléctrico colombiano	...
Integración de redes inteligentes	...
Implementación del vehículo eléctrico	...
Implementación de energías renovables en Zonas No Interconectadas	...
Desarrollo de proyectos de micro-redes	...
Generación con fuentes no convencionales de energía	...

* **En el desarrollo e implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores en el sector eléctrico colombiano ¿cuál es el nivel de importancia de los siguientes aspectos?**

(Seleccione de una escala de 1 a 5, donde 5 es alto nivel de importancia y 1 es bajo nivel de importancia)

	Nivel de importancia
Crecimiento de la demanda de energía en el país	...
Incremento de la inversión extranjera	...
Inversión en investigación y desarrollo	...
Costos económicos en la implementación o desarrollo de los ultracapacitores	...
Fortalecimiento de capacidades en investigación y desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía	...

* **¿Qué otras estrategias considera que tienen impacto en el desarrollo e implementación de las aplicaciones de los ultracapacitores en el sector eléctrico colombiano?**

Continuar después

« Anterior Enviar

Salir y borrar la encuesta »