

VIGILANCIA TECNOLÓGICA SOBRE COMPENSADORES DE TENSIÓN EN CORRIENTE  
DIRECTA Y SU USO EXTENSIVO EN LA PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE  
ELÉCTRICO

EDISON DE JESÚS MANRIQUE OSPINA

LUIS EDUARDO CASTRILLÓN AGUDELO

Seminario de Investigación II

Docente

Carlos Ocampo López, PhD

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2014

## CONTENIDO

1	RESUMEN EJECUTIVO.....	6
2	ASPECTOS TÉCNICOS.....	11
3	ASPECTOS DE MERCADO.....	13
4	PERTINENCIA TÉCNICA DESDE FUENTES DE INFORMACIÓN PRIMARIA.....	16
5	ANÁLISIS TENDENCIAL.....	18
5.1	METODOLOGÍA .....	18
5.1.1	Sistemas de compensación en corriente directa. ....	18
5.1.2	Planeación de los sistemas de suministro de energía de sistemas de transporte eléctrico.....	28
6	BIBLIOGRAFÍA.....	36

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Referentes técnicos	11
Tabla 2. Aspectos de mercado de los sistemas de compensación cd basados en ultracapacitores	13
Tabla 3. Fuentes primarias de información	16
Tabla 4. Patentes relacionadas con los compensadores cd.	27

## LISTA DE REGISTROS

Registro 1. Ecuación de búsqueda referentes técnicos sistemas de compensación	19
Registro 2. Ecuación de búsqueda de patentes sistema de compensación	24
Registro 3. Ecuación de búsqueda referentes técnicos planeación	28
Registro 4. Ecuación de búsqueda de patentes planeación	33

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Documentos sistema de compensación por año	20
Gráfico 2. Documentos sistema de compensación por año y por fuente	21
Gráfico 3. Documentos sistema de compensación por autor	21
Gráfico 4. Documentos sistema de compensación por afiliación	22
Gráfico 5. Documentos sistema de compensación por país	22
Gráfico 6. Documentos sistema de compensación por tipo	23
Gráfico 7. Documentos sistema de compensación por área temática	23
Gráfico 8. Patentes por países	25
Gráfico 9. IPC más relevantes	25
Gráfico 10. Patentes por aplicante	26
Gráfico 11. Patentes por inventor principal	26
Gráfico 12. Patentes por año	27
Gráfico 13. Documentos planeación por año	29
Gráfico 14. Documentos planeación por fuente y por año planeación	30
Gráfico 15. Documentos planeación por autor	30
Gráfico 16. Documentos planeación por afiliación	31
Gráfico 17. Documentos planeación por país	31
Gráfico 18. Documentos planeación por tipo	32
Gráfico 19. Documentos planeación por área temática	32

# VIGILANCIA TECNOLÓGICA SOBRE COMPENSADORES DE TENSIÓN EN CORRIENTE DIRECTA Y SU USO EXTENSIVO EN SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICO

## 1 RESUMEN EJECUTIVO

La reducción del consumo energético en todos los medios de transporte es una necesidad crítica a escala mundial. La creciente crisis energética y ambiental a nivel global (la inestabilidad de los precios del petróleo y sus derivados como consecuencia de eventos mundiales(ver Gráfico 1), la creciente demanda, el calentamiento global, la contaminación (ver Gráfico 3)[1], ha generado la necesidad de ahorro energético en todos los sectores de la industria. Esta urgencia se manifiesta especialmente en el sector transporte, dado que es uno de los sectores más intrínsecamente entrelazado con la crisis energética y ambiental, por su participación en el consumo de energía no renovable fósil y contribución en emisiones de gases de efecto invernadero (ver Gráfico 2).

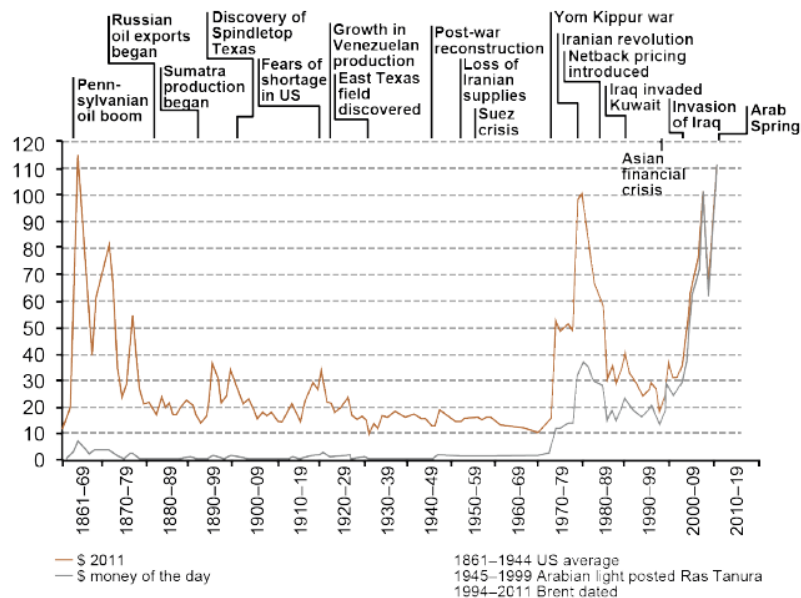


Gráfico 1. Precios del petróleo crudo 1861 – 2011, [US dólares por barril – eventos mundiales], [1]

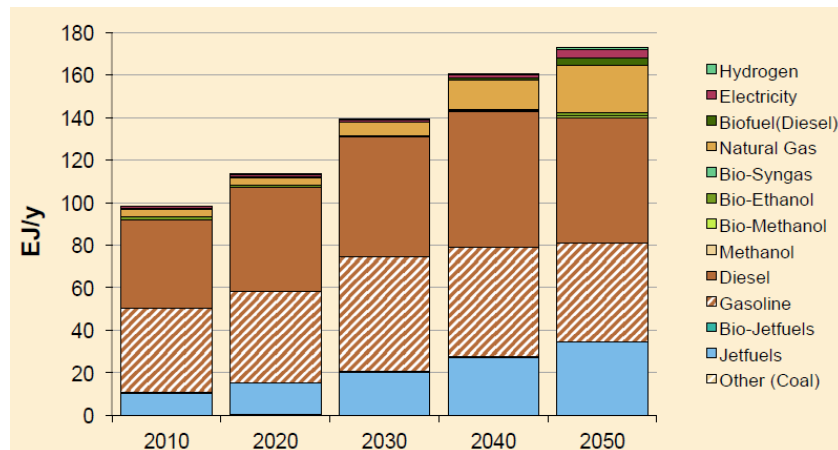


Gráfico 2. Proyección consumo de combustibles en todos los medios de transporte [EJ/y: exaJoule/año], [1]

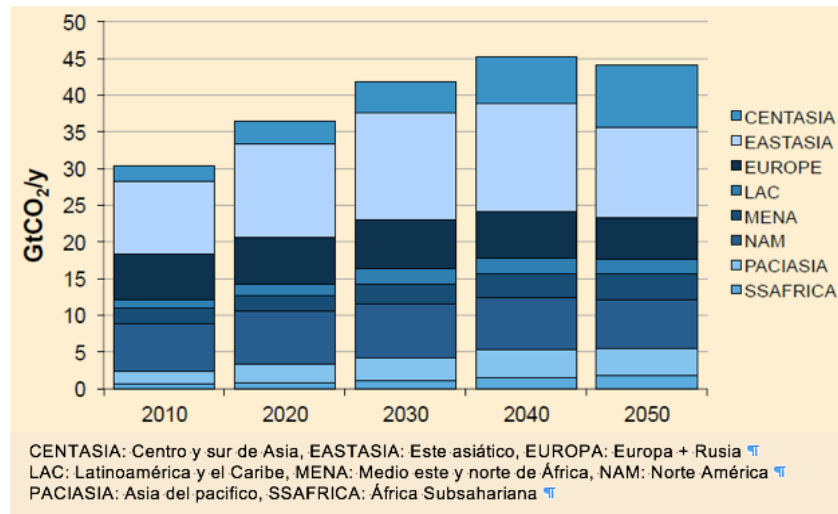


Gráfico 3. Proyección de las emisiones de CO2 [GtCO2/y: gigatoneladas de CO2 por año], [1]

En adición a la crisis global mencionada, **El Metro de Medellín es un sistema de transporte que no está subsidiado por el gobierno, se auto-sostiene con la tarifa del usuario, y actualmente reconoce una deuda de USD50 millones**[2]. Debido a esto, los ahorros energéticos que se logren en operación, se verán favorablemente reflejados en la tarifa, con todas las consecuencias sociales que esto implica si se tiene en cuenta el cada vez mayor peso del rubro transporte en la canasta familiar de los habitantes del área metropolitana del Valle de Aburrá.

**En un estudio anterior** elaborado por La UPB, con la participación del área de Ingeniería del Metro de Medellín, mediante simulación de las condiciones eléctricas en uno de los trenes bajo operación típica, **se identificó un buen potencial de ahorro de energía en la disipación de las resistencias de frenado**. La instalación de sensores para establecer la energía que se disipa en esta resistencia permitió tomar lecturas preliminares que muestran una primera aproximación a la validación de las estimaciones realizadas. Es importante señalar que las resistencias previas de frenado no se consideraron por su importante rol en la dinámica de frenado, por lo que cualquier intervención en las mismas, traería importantes consecuencias en el proceso.

En términos energéticos, la generación de energía eléctrica a partir de la energía cinética del tren, o frenado regenerativo, se puede entender como una disminución en la energía que aporta el sistema al tren. En el esquema actual esta energía se aprovecha por otro tren, en mayor o menor medida, dependiendo de la distancia a la que se encuentren, bien sea Línea A o Línea B; de no haber consumidor, la tensión se eleva hasta 1.800 V, si se supera este valor, el sistema de mando y control del tren da la orden de disipar esta energía en forma de calor en las resistencias de frenado. Esta última condición suele ser frecuente por lo que una buena parte de la energía generada no es aprovechada sino convertida en calor no útil [3]–[5].

Previo a la formulación de la propuesta, **se efectuó una medición en la vía de pruebas del Metro de Medellín**. En la prueba, el tren consumió alrededor de 4,34 kWh en el trayecto de estudio de 1.500 m, pero al frenar **recuperó 0,49 kWh que representan un 11% del total consumido inicialmente**. El consumo neto, teniendo en cuenta la energía recuperada fue de 3,85 kWh. En el mismo recorrido, en la resistencia de frenado se disipó una energía de 0,52 kWh, que en este caso supera la energía recuperada. Para esta medida se instalaron registradores especiales de voltaje y corriente debidamente



calibrados. Si esta energía pudiera aprovecharse, **el consumo total del tren (para este caso) sería de 3,33 kWh, representando un 23% de ahorro de energía en comparación con la operación actual**, lo que es bastante significativo. Sin embargo este experimento en la vía de prueba no puede ser utilizado para establecer la energía recuperable en el sistema real del Metro de Medellín, por cuanto en este tramo no hay otros trenes consumidores que reciban la energía regenerada. En operación real es de esperar que la energía aprovechable sea más baja que la registrada en la vía de pruebas debido a la presencia de otros trenes.

Mediciones posteriores en operación comercial han permitido estimar que **la recuperación en el peor escenario sea acotada a un potencial del 1%**. En términos generales **una unidad de tres coches del Metro de Medellín consume en promedio cerca de 9 kWh/km**, de los que **se disipan aproximadamente 0,09 kWh/km en las resistencias de frenado**. Si un tren recorre 120.000 km-año, se tendría una disipación total de 10,8 MWh/año, lo que en el sistema colombiano de generación de electricidad **implica una emisión de cerca de 1,55 tons de CO<sub>2</sub> [6] y un costo cercano a los \$2,5 Millones-año por cada tren**.

Esto demuestra la incidencia que un sistema como el propuesto tendría tanto para la sostenibilidad económica como ambiental del sistema, sin mencionar los beneficios relativos a la estabilización de voltaje, que se traducen en una mayor vida útil de los equipos y las posibilidades de reducir los costos de inversión de expansiones futuras al lograrse mayores distancias entre subestaciones.

En cuanto a la disponibilidad comercial de convertidores cd-cd para controlar el banco de ultracapacitores, puede decirse que es limitada en los niveles de potencia, tensión y energía que requieren los sistemas de tracción. Así mismo las restricciones del mercado y la especificidad de cada aplicación hacen que su costo sea una barrera. Sin embargo, al

tener una topología simple y estar contruidos por relativamente pocos componentes, los convertidores de esta naturaleza constituyen un equipo con gran oportunidad de desarrollo local.

El compensador de tensión propuesto hace parte de un proyecto de investigación cofinanciado por COLCIENCIAS, presentado por la Universidad Pontificia Bolivariana y el Metro de Medellín, el cual se titula: **“Sistema de compensación en corriente directa para aprovechamiento de frenado regenerativo basado en ultracapacitores”**, que tiene los siguientes objetivos generales que deben lograrse en dos tesis de grado:

- Proponer un modelo de compensación en corriente directa, las estrategias para su implementación y los protocolos para la integración en la operación de empresas de transporte eléctrico masivo.
- Proponer una metodología para evaluar la pertinencia técnica y financiera del uso extensivo de esquemas de compensación en corriente directa basados en ultracapacitores, para aprovechar la energía regenerada en el proceso de frenado en sistemas de transporte eléctrico.

## 2 ASPECTOS TÉCNICOS

Tabla 1. Referentes técnicos

Nombre	Palabras claves	Encontrado en	Correo electrónico
Philippe Barrade	Energy storage, Supercapacitors, Voltage drop compensation	<a href="http://www.investigacion-ffe.es/documentos/elecrail/M4-ElecRail_Sistemas_acumulaci%C3%B3n.pdf">http://www.investigacion-ffe.es/documentos/elecrail/M4-ElecRail_Sistemas_acumulaci%C3%B3n.pdf</a>	<a href="mailto:philippe.barrade@epfl.ch">philippe.barrade@epfl.ch</a>
Diego Iannuzzi	Electrical traction systems, ESSs control, SCAPs (Supercapacitors), Kalman Filter	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&amp;arnumber=6264499&amp;url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6264499">http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&amp;arnumber=6264499&amp;url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6264499</a>	<a href="mailto:diego.iannuzzi@unina.it">diego.iannuzzi@unina.it</a>
Yu Ying Yao	Supercapacitor, voltage sharing	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&amp;arnumber=4116295&amp;queryText%3DA+study+of+supercapacitor+parameters+and+characteristics">http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&amp;arnumber=4116295&amp;queryText%3DA+study+of+supercapacitor+parameters+and+characteristics</a>	<a href="mailto:yaoyuying@hitsz.edu.cn">yaoyuying@hitsz.edu.cn</a>
Han Min Lee	Catenary voltage; Energy saving	<a href="https://www.scopus-com.consultaremot.upb.edu.co/authid/detail.url?origin=resultslist&amp;authorid=35409842800&amp;zone=">https://www.scopus-com.consultaremot.upb.edu.co/authid/detail.url?origin=resultslist&amp;authorid=35409842800&amp;zone=</a>	<a href="mailto:hanmin@krii.re.kr">hanmin@krii.re.kr</a>
Julien Morand	Energy savings, Ultra capacitors, Rail vehicle,	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&amp;arnumber=6631993&amp;url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6611296%2F6631728%2F06631993.pdf%3Farnumber%3D6631993">http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&amp;arnumber=6631993&amp;url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6611296%2F6631728%2F06631993.pdf%3Farnumber%3D6631993</a>	<a href="mailto:jmorand@adeneo.eu">jmorand@adeneo.eu</a>
Alireza Khaligh	Ultracapacitor, Storage Systems , Electric Vehicles	<a href="http://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2262/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5446335">http://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2262/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5446335</a>	<a href="mailto:khaligh@ece.umd.edu">khaligh@ece.umd.edu</a>
J. Locker	Ultracapacitor, Energy Storage System	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=DEVELOPMENT+OF+AN+ULTRACAPACITOR-BASED+INTERMEDIATE">http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=DEVELOPMENT+OF+AN+ULTRACAPACITOR-BASED+INTERMEDIATE</a>	<a href="mailto:jlocker@titan.com">jlocker@titan.com</a>
Michael Steiner	Energy storage, SuperCapacitors, Railway vehicles, Traction	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=Energy+Storage+System+with+UltraCaps+on+Board+of+Railway+Vehicles">http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=Energy+Storage+System+with+UltraCaps+on+Board+of+Railway+Vehicles</a>	<a href="mailto:michael.steiner@de.transport.ombardier.com">michael.steiner@de.transport.ombardier.com</a>
Istvan Szenasy	Regenerative braking, supercapacitor, Electric vehicle, Energy storage	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=Improvement+the+Energy+Storage+with+Ultracapacitor+in+Metro+Railcar+by+Modeling+and">http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=Improvement+the+Energy+Storage+with+Ultracapacitor+in+Metro+Railcar+by+Modeling+and</a>	<a href="mailto:szenasy@sze.hu">szenasy@sze.hu</a>
Michel Avart	Tram-train, Ultracapacitors, Energy management	<a href="http://www.uic.org/cdrom/2001/wcrr2001/pdf/sp/1_17/478.pdf">http://www.uic.org/cdrom/2001/wcrr2001/pdf/sp/1_17/478.pdf</a>	<a href="mailto:michel.avart@sncf.fr">michel.avart@sncf.fr</a>
Federica Foidelli	Electric traction, Energy saving, Regenerative braking, Storage systems, Transportation systems, supercapacitor	<a href="http://cmrt.centrale-marseille.fr/cpi/ever09/documents/papers/ev6/EVER09-paper-110.pdf">http://cmrt.centrale-marseille.fr/cpi/ever09/documents/papers/ev6/EVER09-paper-110.pdf</a>	<a href="mailto:federica.foidelli@polini.it">federica.foidelli@polini.it</a>
Diego Iannuzzi	Supercapacitors, Energy recovery	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=Improvement+of+the+Energy+Recovery+of+Traction+Electrical+Drives+using+Supercapacitors">http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&amp;queryText=Improvement+of+the+Energy+Recovery+of+Traction+Electrical+Drives+using+Supercapacitors</a>	<a href="mailto:diandiego@unina.it">diandiego@unina.it</a>

El estudio de los referentes técnicos permite evidenciar lo siguiente:

- El desarrollo de la electrónica de potencia y de los convertidores cd-cd facilita el uso de ultracapacitores como medio de almacenamiento de energía y su aplicación en sistemas de transporte eléctrico, dado que requieren altas densidades de potencia en cortos periodos de tiempo, tal como ocurre en el proceso de frenado y arranque de los sistemas férreos [7]–[18].
- Las variables más relevantes a controlar, para garantizar la vida útil y la óptima operación de los ultracapacitores, son la temperatura y el voltaje. Maxwell, fabricante de los ultracapacitores que se usarán en el sistema de compensación

prototipo del Metro de Medellín, en la ficha de datos especifica un voltaje por celda de 2,6 V y una temperatura de operación, medida en la carcasa de cada celda, entre -40°C y 65°C. Las diferentes referencias consultadas [7], [17] indican que la vida útil se reduce a la mitad cuando el voltaje por cada celda aumenta 0,2 V o la temperatura se incrementa 10°C, determinada experimentalmente a un voltaje de 0 V y a una temperatura de 25°C. La afectación de la vida útil, como consecuencia, afecta el ROI del proyecto.

- El modelo eléctrico de un ultracapacitor, para ser usados en software de simulación, se encuentra en referencias tales como [7], según la cual un ultracapacitor se modela como una capacitancia con una resistencia en serie.
- La importancia de las protecciones y los equipos de accionamiento, al integrar sistemas de compensación a los sistemas de potencia [17].
- Como complemento del sistema de compensación se evidencia el potencial de ahorro de energía que puede obtenerse, dado que el compensador suministra la potencia pico demandada por un tren durante el proceso de arranque, lo cual depende de la topología del sistema y de las características específicas del tren [14].
- La efectividad del uso de sistemas de compensación para controlar las caídas de tensión y las sobretensiones presentes durante el arranque y frenado de los vehículos ferroviarios[14]. Al suavizar los picos de corriente en la red y almacenar los sobrantes durante el frenado, se realiza un ahorro importante de energía con el respectivo efecto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> contribuyendo al medio ambiente.
- Los niveles de tensión en los cuales existen mayor cantidad de equipos desarrollados está entre 600 y 750 V cd, ya que son niveles de tensión en los que se encuentran la mayoría de sistemas de transporte urbanos.
- La importancia de la optimización del ultracapacitor y los efectos de cargarlo a potencia constante vs cargarlo a corriente constante, pudiendo evidenciar que la aplicación específica para sistemas ferroviarios debe emplear un sistema de carga a potencia constante, dado que el tiempo de carga es crítico [19].

En consecuencia, se valida la pertinencia de los trabajos de grado propuestos, toda vez que no es común encontrar referencias que evidencien metodologías para la caracterización de la implementación de sistemas de compensación en sistemas de transporte eléctrico y para evaluar la inclusión de sistemas de compensación en la planificación de los sistemas de suministro de energía de los sistemas de transporte eléctrico.

### 3 ASPECTOS DE MERCADO

El mercado objetivo para esta tecnología son las ciudades latinoamericanas que tienen sistemas de transporte eléctrico en las diferentes modalidades (metro, tranvía) actualmente las ciudades que cuentan con sistema Metro son: Argentina (2), Brasil (7), Chile (1), Ecuador (1), México (3), Panamá (1), Perú (1), Puerto Rico (1) y República Dominicana (1).

Un equipo a ser instalado en una sola localización de un sistema ferroviario de una capacidad para almacenar la energía de frenado de un tren convencional que puede ser alrededor de 4kWh, como en el caso del Metro de Medellín, tiene un costo aproximado de \$1.347.148.800, de acuerdo a información no vinculante recibida de fabricantes de este tipo de equipos tales como Siemens e Ingeteam a precios de 2014.

Lo que haría viable la implementación, si un sistema de compensación pudiera suplir la implementación de una subestación de tracción eléctrica que cuesta alrededor de \$7.371.245.041; costo real de montaje de una subestación de tracción del Metro de Medellín actualizado al año 2014.

Con base en lo anterior queda claro que la implementación de un equipo de este tipo no lo determina el potencial de ahorro de energía, lo hace viable el ahorro en la magnitud de la inversión en infraestructura eléctrica.

Los atributos de mercado más relevantes y las empresas que lideran este segmento de mercado se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2. Aspectos de mercado de los sistemas de compensación cd basados en ultracapacitores**

<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Producto</b>
ABB	Suiza	EnvilineESS
<b>Descripción</b>		
Sistema de almacenamiento de energía (ESS) que consiste en captar y almacenar la energía generada durante la secuencia de frenado de un tren. Esta energía puede ser consumida por los trenes adyacentes o bien almacenarse en un condensador de doble capa y posteriormente reinyectarse en la red cuando sea necesario.		
<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Producto</b>
SIEMENS	Alemania	SitrasSES, Sitras MES, SitrasHES
<b>Descripción</b>		
El SitrasSES ( <i>Stationary Energy Storage System</i> ) es un sistema de almacenamiento de energía basado en		

ultracapacitores e instalado en tierra, que almacena la energía de las frenadas de los vehículos que se alimentan de la catenaria conectada al Sitras y aporta los picos de potencia cuando lo requiere cualquier vehículo.

El Sitras MES (*Mobile Energy Storage System*) es un sistema de almacenamiento de energía basado en el uso de ultracapacitores. El banco de ultracapacitores está instalado a bordo del vehículo, en el techo de éste, por lo que se clasifica dentro de los sistemas embarcados, y ayuda a la recuperación de parte de la energía generada en las frenadas.

SitrasHES (*HybridEnergy Storage System*) es un sistema híbrido que combina dos unidades de almacenamiento: el banco de ultracapacitores del Sitras MES y un sistema de tracción formado por baterías de NiMH.

Es un producto de línea.

Empresa	País	Producto
INGETEAM	España	Ingeber

**Descripción**

El sistema INGEBER desarrollado por Ingeteam permite superar todas las limitaciones en la devolución de energía por parte de las unidades. El sistema consta de un equipo de electrónica de potencia, instalado en la subestación y conectado a los equipos principales ya existentes de la subestación tales como transformador y rectificador.

El sistema monitoriza continuamente la catenaria, hasta detectar el momento en el que existe una energía de frenada de un vehículo, no susceptible de ser utilizada por otro. En ese momento, el sistema extrae esta energía de la catenaria y la transforma de acuerdo con los parámetros de calidad de la red de suministro, de manera que esta energía pueda ser inyectada en la red de alimentación.

Empresa	País	Producto
MAXWELL	USA	Ultracapacitores

**Descripción**

El enfoque principal de Maxwell está en ultracapacitores, dispositivos de almacenamiento de energía que se caracterizan por una alta densidad de potencia, larga vida útil, capacidad de carga y descarga muy rápida, y un rendimiento fiable a temperaturas extremas. Los productos de Maxwell basados en ultracapacitores proporcionan soluciones de almacenamiento de energía y entrega de potencia para aplicaciones en muchas industrias, incluyendo, transporte pesado, automotriz, energía renovable, sistemas de potencia ininterrumpida (UPS), comunicaciones inalámbricas y electrónica de consumo e

industrial.		
<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Producto</b>
SECHERON	Suiza	ESS
<b>Descripción</b>		
<p>Sistemas de almacenamiento de energía (ESS), diseñados para almacenar la energía de frenado de los vehículos con capacidad de almacenamiento de 1 a 16kWh. Este sistema se basa en módulos de ultracapacitores y controlado convertidor de chopper con IGBTs.</p>		
<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Producto</b>
BOMBARDIER	Canadá	EnerGstor
<b>Descripción</b>		
<p>Almacena la energía recuperada en la frenada en un banco de ultracapacitores para su posterior uso durante la aceleración.</p>		
<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Producto</b>
ALSTOM	Francia	STEEM
<b>Descripción</b>		
<p>Mediante el empleo del freno regenerativo la energía de frenado es acumulada en las ultracapacitores y empleada en la fase de propulsión. La mejora en el consumo obtenida por un tranvía con cofre STEEM al compararlo con el consumo de un tranvía clásico es de alrededor del 20%-24%.</p> <p>Una de las principales ventajas de este sistema es la alta velocidad de carga y descarga. Sin embargo, una de las limitaciones importantes es que no es adecuado para trayectos sin catenaria, ya que no tiene reserva de energía para modos degradados. Además, el sobrepeso tiene un efecto importante en el consumo energético (variaciones de hasta 2,5 kWh en el consumo energético entre tranvía vacío y tranvía a plena carga).</p>		
<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Producto</b>
CAF	España	ACR
<b>Descripción</b>		
<p>Un Acumulador de Carga Rápida (ACR) es un sistema de almacenamiento de energía embarcado que permite tanto la circulación de los tranvías sin necesidad de catenaria, como el</p>		

ahorro energético por la recuperación de la energía generada durante el frenado.

Una de sus características más destacables es que es un sistema modular, donde cada módulo o rama está formado por un determinado número de ultracapacitores en serie. Esta modularidad permite configurar el ACR en base a las necesidades de potencia y energía requeridas para cada aplicación, colocando más o menos módulos en paralelo.

Además, al estar compuesto por ultracapacitores, el sistema tendrá alta densidad de potencia pero baja densidad energética. En caso necesario, es posible colocar una rama de baterías para aumentar la cantidad de energía acumulada.

Además de los módulos de ultracapacitores y baterías, el ACR contiene un convertidor cd/cd que controla el nivel de tensión y, en algunos casos, actúa como cuello de botella para la potencia.

#### 4 PERTINENCIA TÉCNICA DESDE FUENTES DE INFORMACIÓN PRIMARIA

En la búsqueda de fuentes de información primaria, se consideró importante contactar los referentes técnicos y comerciales relacionados en la Tabla 2, de los cuales pudo entrevistarse a los relacionados en la Tabla 3, para lo cual se elaboró y se envió el cuestionario que se muestra en el Anexo 1, con el objetivo de validar la pertinencia de la propuesta de investigación.

**Tabla 3. Fuentes primarias de información**

<b>Persona/Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Datos de contacto</b>
AsierRomo, PhD / <i>Ingeteam</i> <i>Power Technology, S.A.</i>	España	<a href="mailto:Asier.romo@ingeteam.com">Asier.romo@ingeteam.com</a>



<p>Conclusiones:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La caracterización del sistema de compensación en la red a la cual se integrará es obligatoria, dado que cada sistema es particular.</li> <li>2. En el tema de planificación el entrevistado no evidenció referentes que hayan incluido esquemas de compensación desde el diseño o la repotenciación del sistema de suministro de energía para una red ferroviaria.</li> </ol> <p>Dichas conclusiones permiten validar la pertinencia de los trabajos de grado planteados en torno del proyecto de investigación en desarrollo.</p>		
<b>Persona/Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Datos de contacto</b>
Nathan Weissman BSEE, MBA <i>/ Maxwell Technologies, Inc.</i>	USA	<a href="mailto:nwaissman@maxwell.com">nwaissman@maxwell.com</a>
<p>Conclusiones</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lo más importante en el cuidado de los ultracapacitores consiste en controlar el voltaje y la temperatura de estos, dado que de ello depende su vida útil.</li> <li>2. Los sistemas de compensación son importantes para controlar la estabilidad de tensión en los sistemas de transporte eléctrico y cobran relevancia en el evento de entrada de nueva de flota o expansión de la vía férrea.</li> <li>3. Los sistemas de compensación basados en ultracapacitores no se han masificado debido al alto costo de la tecnología.</li> </ol> <p>Esta entrevista ratifica la pertinencia de los trabajos de investigación que se proponen en este proyecto.</p>		
<b>Persona/Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Datos de contacto</b>
Manuel Bueso <i>/ Asea Brown Boveri S.A. DMPC / Transportation &amp; Power Control</i>	España	<a href="mailto:manuel.bueso@es.abb.com">manuel.bueso@es.abb.com</a>
Entrevista pactada para el 21 de octubre de 2014. No fue posible realizarla por disponibilidad.		

## **5 ANÁLISIS TENDENCIAL**

Con el fin de conocer las tendencias en investigación a nivel mundial sobre el uso de sistemas de compensación en corriente directa que utilizan los ultracapacitores como medio de almacenamiento y su incidencia en la planeación de los sistemas de suministro de energía de sistemas de transporte eléctrico, es indispensable realizar un sondeo para conocer los países que más han investigado sobre la temática específica, analizar su producción científica y analizar el comportamiento del mercado de este tipo de tecnologías.

### **5.1 METODOLOGÍA**

Se realizó la búsqueda de información utilizando las herramientas disponibles y conocidas tales como, *Google KeywordTool*, *Google Trends*, *Carrot2*, *osti.gov*, *Scopus*, *cordis.europa.eu*.

#### **5.1.1 Sistemas de compensación en corriente directa.**

Para realizar la búsqueda relacionada con los sistemas de compensación en corriente directa basados en ultracapacitores correspondiente al trabajo de grado de Edison Manrique, se introdujo en Scopus la ecuación como se muestra en el Registro 1, obteniéndose como resultado 93 registros, para los cuales se realiza el análisis de tendencia descrito a continuación.

The screenshot shows the Scopus search interface with the following details:

- Header:** Scopus logo, user name Edison Manrique Ospina, and navigation links (Search, Alerts, My list, Settings, Help and Contact, Tutorials, Catálogo Athenea UPB).
- Message:** "Scopus releases updated analytical features, read more on the blog."
- Instructions:** "Edit your Saved Search below and click the 'Search' button to confirm that the results of your new search are satisfactory. On the Results page, click the 'Save' link to save the new search."
- Search Navigation:** Back, Document search (selected), Author search, Affiliation search, Advanced search, Browse Sources, Compare journals.
- Search Query:**
  - Supercapacitors (Article Title, Abstract, Keywords)
  - OR ultracaps (Article Title, Abstract, Keywords)
  - OR ultracapacitors (Article Title, Abstract, Keywords)
  - AND train (Article Title, Abstract, Keywords)
  - OR railway (Article Title, Abstract, Keywords)
  - OR rail (Article Title, Abstract, Keywords)
  - AND transportation networks (Article Title, Abstract, Keywords)
  - OR voltage drop compensation (Article Title, Abstract, Keywords)
  - OR Energy storage (Article Title, Abstract, Keywords)
- Limit to:**
  - Date Range (inclusive): Published (All years) to Present
  - Added to Scopus in the last: 7 days
  - Document Type: ALL
  - Subject Areas:
    - Life Sciences (> 4,300 titles.)
    - Health Sciences (> 6,800 titles. 100% Medline coverage)
    - Physical Sciences (> 7,200 titles.)
    - Social Sciences & Humanities (> 5,300 titles.)

**Registro 1. Ecuación de búsqueda referentes técnicos sistemas de compensación**

### 5.1.1.1 Publicaciones científicas

En el Gráfico 4 se puede apreciar las publicaciones científicas producidas a la fecha y acorde a la ecuación de búsqueda ingresada al Scopus.

Las primeras publicaciones científicas fueron en el año 1999 y hasta el año 2005 no creció significativamente con 5 documentos, equivalentes al 7,5% del total de la producción científica, y la mayor producción se presentó en el año 2010 con 17 publicaciones equivalente al 18,27% del total, independiente del tipo o medio en la que fueron publicadas.

El segundo auge de publicaciones científicas se presentó en el año 2013 con 10 publicaciones equivalentes al 10,75% de la producción total. A la fecha en lo corrido del año 2014 se tienen 5 publicaciones científicas.

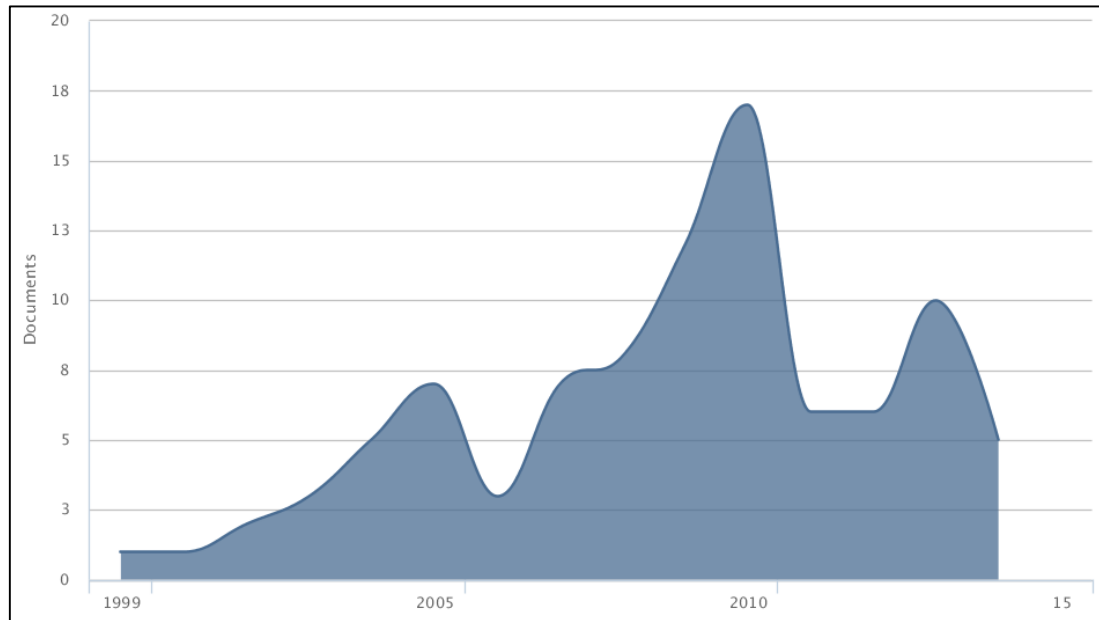


Gráfico 4. Documentos sistema de compensación por año

#### 5.1.1.2 Documentos publicados por año y por fuente

En el Gráfico 5 se puede apreciar el comportamiento de las publicaciones por año y por fuente; en el año 2002 El *SAE<sup>1</sup>TechnicalPapers* publicó 2 artículos igualándose con el *IEEE Transactionson Industrial Electronics*.

En el periodo seleccionado El *SAE technical papers* fue el organismo con mayor cantidad de publicaciones, con 5 artículos seguido de la *IEEE Transaction son Industrial Electronics* con 3 publicaciones al igual que el *Journal of PowerSources*.

---

<sup>1</sup>SAE International is a global association of more than 138,000 engineers and related technical experts in the aerospace, automotive and commercial-vehicle industries.

Las demás instituciones publicaron entre 1 y 2 artículos en diferentes años del periodo seleccionado.

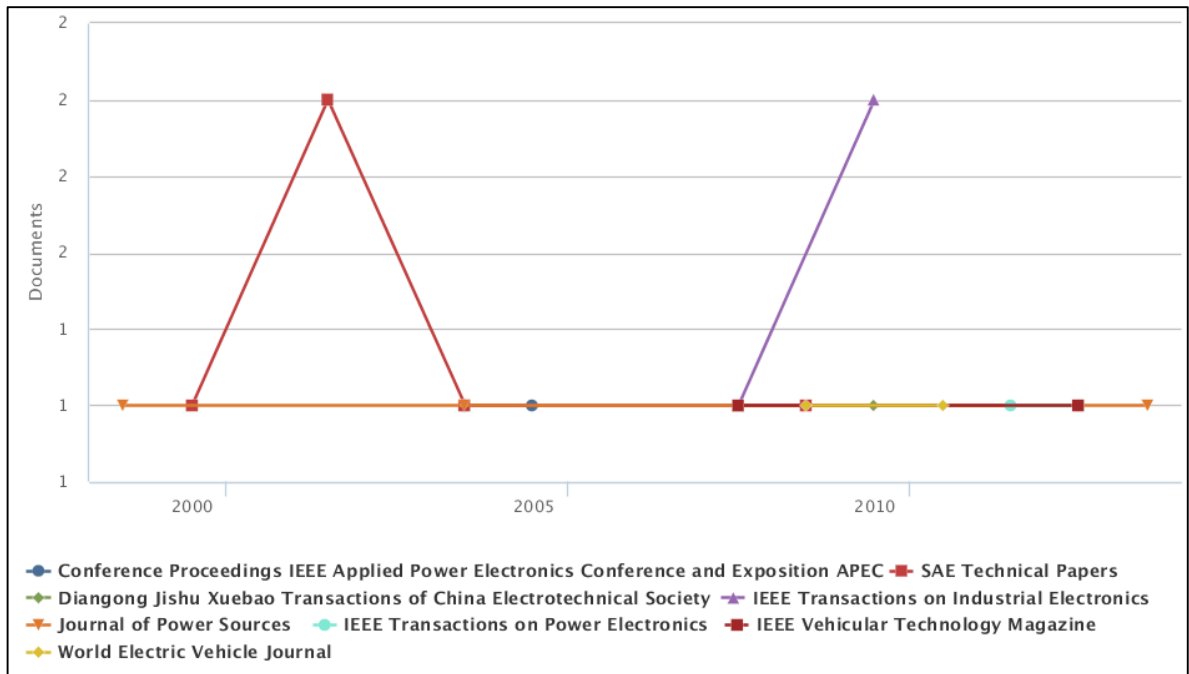


Gráfico 5. Documentos sistema de compensación por año y por fuente

### 5.1.1.3 Documentos por autor

En el Gráfico 6 se aprecia los autores de las publicaciones encontradas

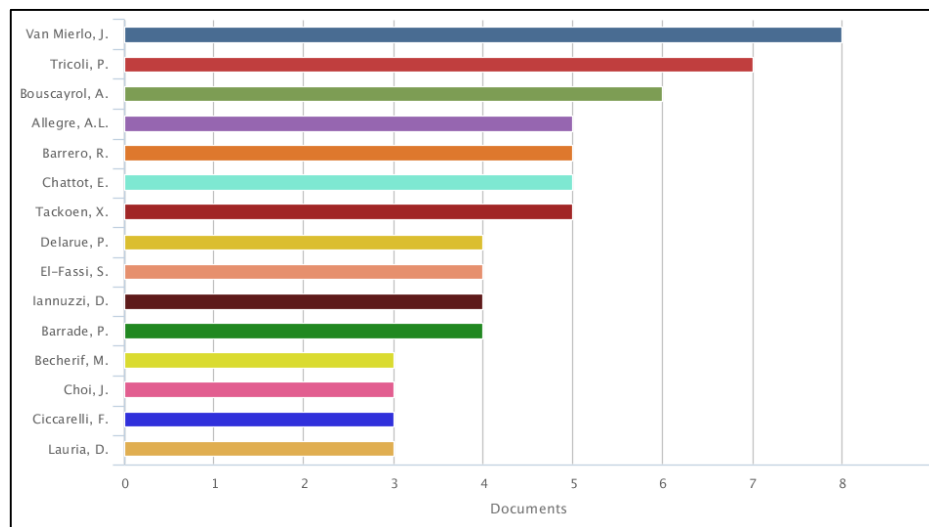


Gráfico 6. Documentos sistema de compensación por autor

#### 5.1.1.4 Documentos por afiliación

En el Gráfico 7 se aprecia la cantidad de documentos publicados por afiliación.

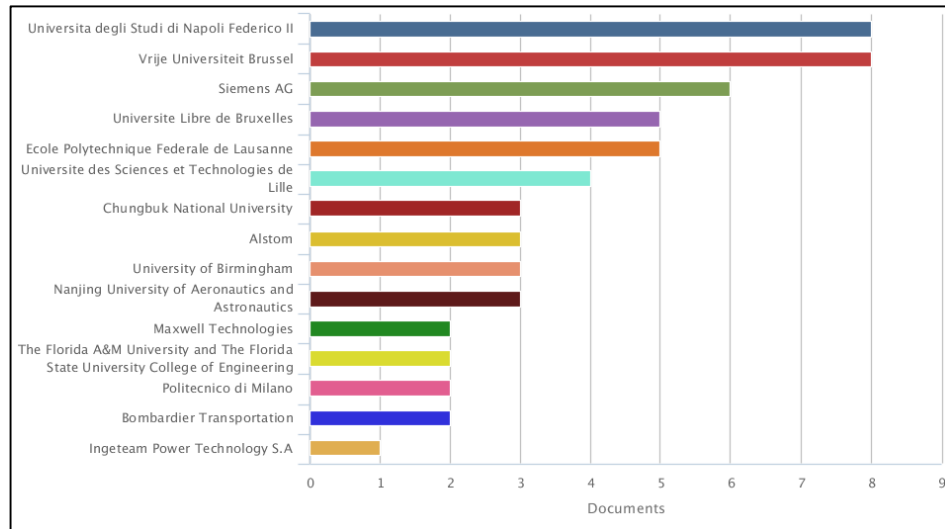


Gráfico 7. Documentos sistema de compensación por afiliación

#### 5.1.1.5 Documentos por país

En el Gráfico 8 se aprecia la cantidad de documentos producidos por país.

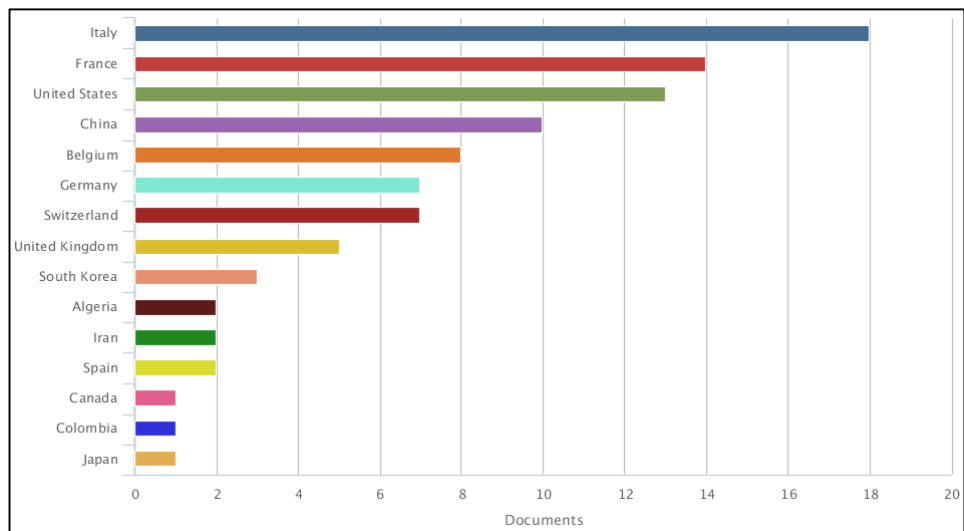


Gráfico 8. Documentos sistema de compensación por país

### 5.1.1.6 Documentos por tipo

En el Gráfico 9 se aprecia la cantidad de documentos por tipo de publicación.

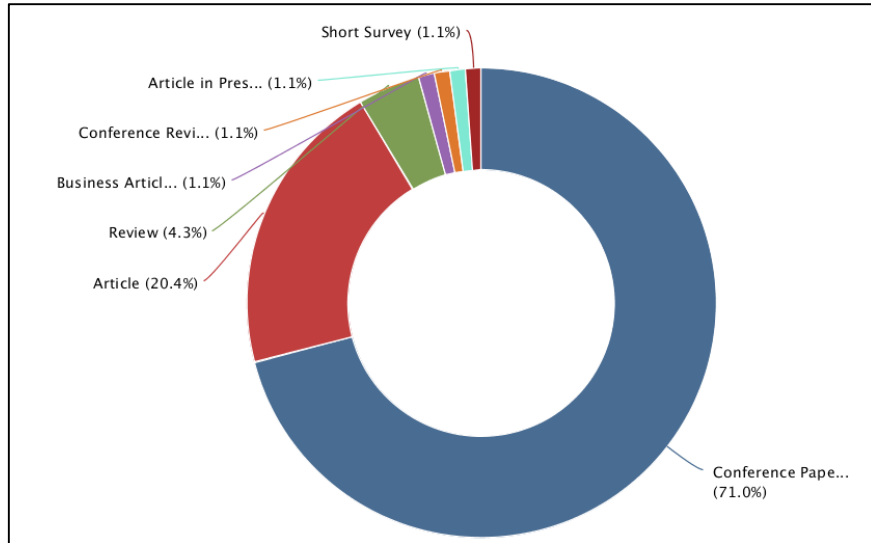


Gráfico 9. Documentos sistema de compensación por tipo

### 5.1.1.7 Documentos por área temática

En el Gráfico 10 se aprecia la cantidad de documentos por área temática.

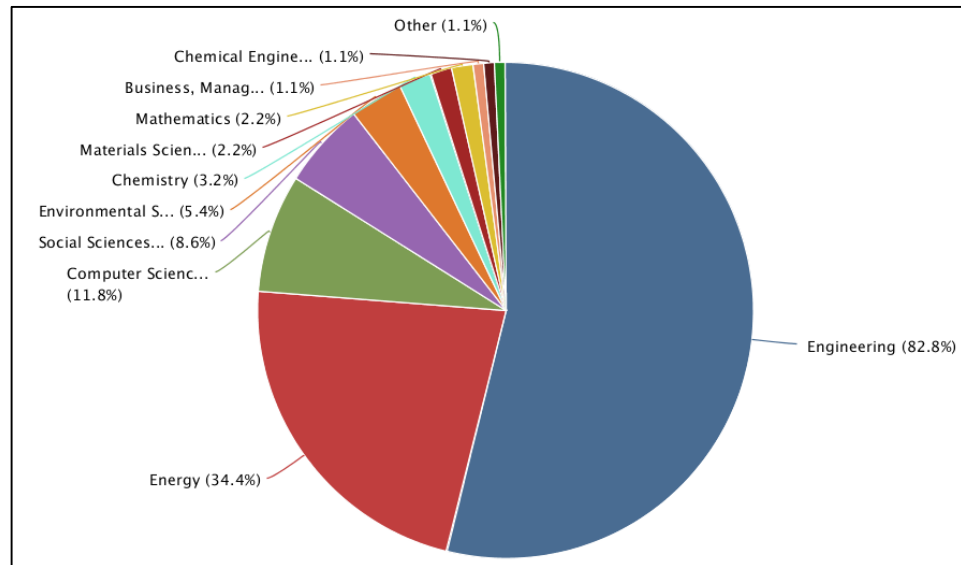


Gráfico 10. Documentos sistema de compensación por área temática

### 5.1.1.8 Vigilancia de Patentes

Para la búsqueda de las patentes referentes en los últimos 10 – 15 años sobre sistemas de compensación en corriente directa, se recurrió al *World Intellectual Property Organization (WIPO)* mediante el uso del *International Patent Classification (IPC)* y por medio de palabras claves; la ecuación de búsqueda utilizada se muestra a continuación así como los resultados.

The screenshot displays the WIPO PATENTSCOPE search interface. At the top, the WIPO logo and 'PATENTSCOPE' text are visible, along with a language menu including Mobile, Deutsch, Español, Français, 日本語, 한국어, Português, Русский, and 中文. Below this is a navigation bar with 'Search', 'Browse', 'Translate', 'Options', 'News', 'User: ejmospina@gmail.com', and 'Help'. The breadcrumb trail reads 'Home > IP Services > PATENTSCOPE'. The main search area is titled 'Advanced Search' and contains a search box with the query: `("energy storage" and (railway or tram or trolley) and (ultracap* or supercap* or EDLC) and ("voltage drop" or compensator) not air not truck)`. Below the search box, there are filters for 'Language: English', 'Stem: ', and 'Office: All Specify =>'. A large list of checkboxes allows for filtering by region and office, including 'All', 'PCT', 'Africa' (ARIPO, Egypt, Kenya, Morocco, South Africa), 'Americas' (United States of America, Canada), 'LATIPAT' (Argentina, Brazil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Dominican Rep., Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Mexico, Nicaragua, Panama, Peru, Uruguay), and 'Asia-Europe' (Bahrain, China, Eurasian Patent Office, Estonia, European Patent Office, Germany, Germany(DDR data), Israel, Japan, Jordan, Russian Federation, Russian Federation(USSR data), Singapore, Spain, Republic of Korea, Viet Nam, United Arab Emirates). 'Search' and 'Reset' buttons are at the bottom right, and a 'Tooltip Help' link is at the bottom left.

Registro 2. Ecuación de búsqueda de patentessistema de compensación



- **Patentes por países**

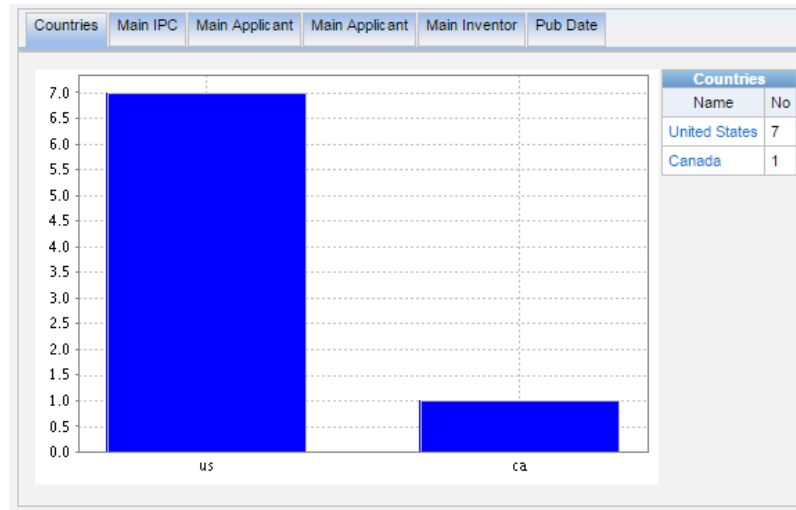


Gráfico 11. Patentes por países

- **InternationalPatentClassification (IPC) más relevantes**

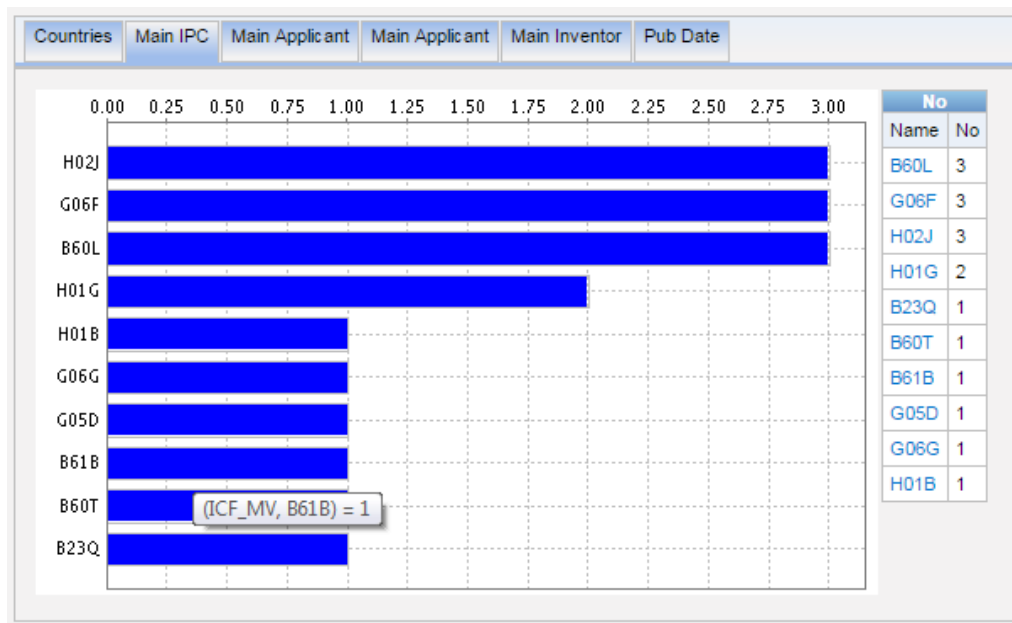
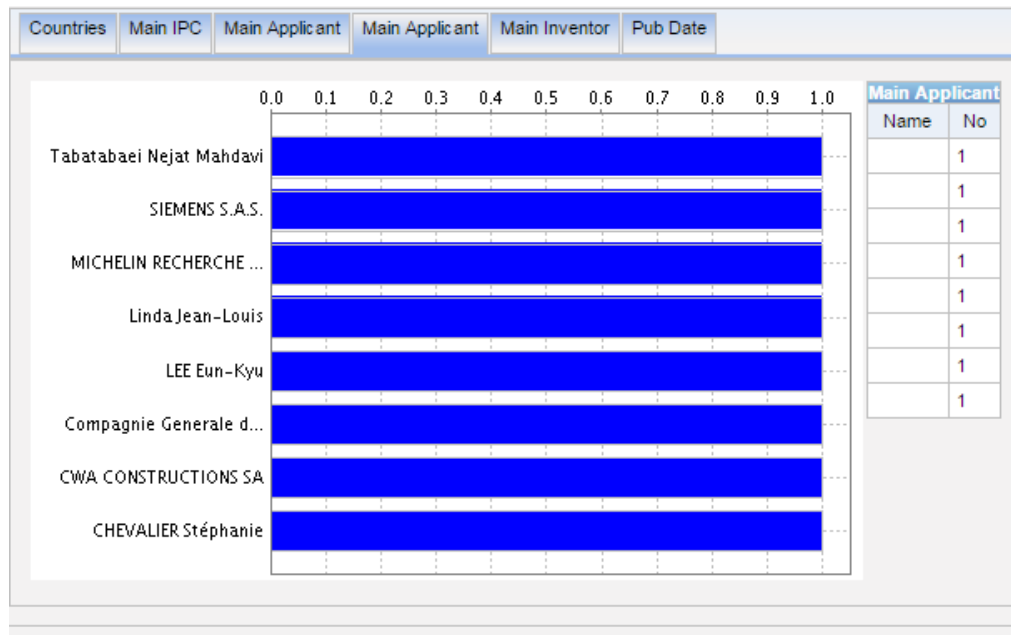


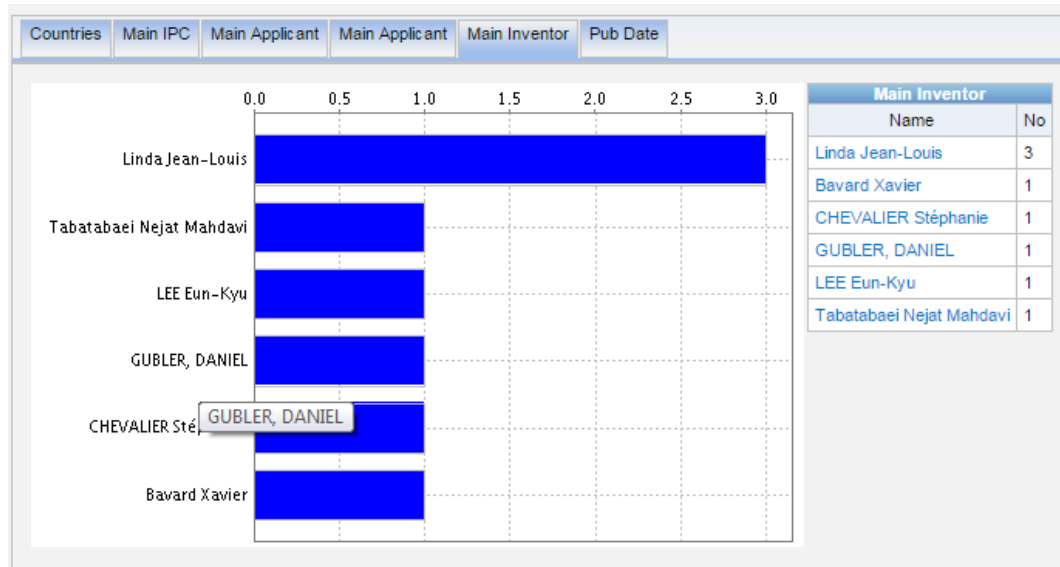
Gráfico 12. IPC más relevantes

- **Patentes por solicitante**



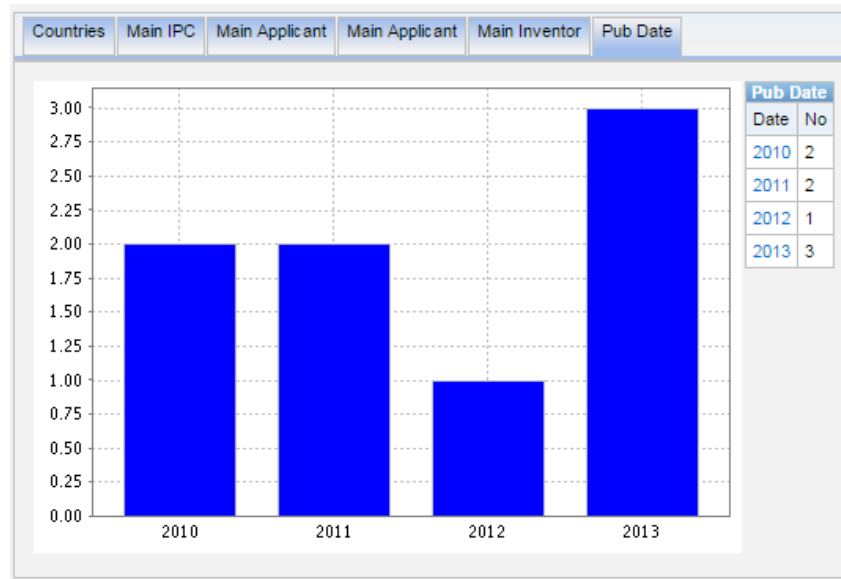
**Gráfico 13. Patentes por solicitante**

- **Patentes por inventor principal**



**Gráfico 14. Patentes por inventor principal**

- **Patentes por año**



**Gráfico 15. Patentes por año**

#### 5.1.1.9 Análisis de patentes

De la vigilancia de patentes se encuentran las siguientes patentes relacionadas con la tecnología a desarrollar para el sistema de compensación cd.

Patente No.	Título
US20130147441	Automatic Tuning Method for Energy Storage System of Railway Vehicle.
US20130175855	Energy Storage Apparatus for Railway Vehicles by Adopting a Bidirectional DC-DC Converter.
US20130270904	Method of Adjusting Power Absorbed by at Least One Electrically Powered Vehicle.

**Tabla 4. Patentes relacionadas con los compensadores cd.**

Del análisis de las patentes se evidencia que:

- La tecnología necesaria para la construcción de un sistema de compensación cd usando ultracapacitores como medio de almacenamiento de energía, está desarrollada.
- El estado actual del proyecto no permite identificar diferencias tecnológicas con lo patentado, sin embargo, no se descarta un posible desarrollo de software que pudiera ser protegido.

### 5.1.2 Planeación de los sistemas de suministro de energía de sistemas de transporte eléctrico.

En Scopus se introdujo la ecuación de búsqueda como se muestra en el siguiente registro, obteniéndose como resultado 44 registros, para los cuales se realiza el análisis de tendencia descrito a continuación.

The screenshot shows the Scopus search interface. At the top, there is a navigation bar with 'Search | Alerts | My list | Settings' and a user profile 'Luis Castrillón | Logout'. Below this is a banner for 'Scopus releases updated analytical features, read more on the blog.' The main search area is titled 'Document search' and includes a search bar with the query '"Energy storage"'. Below the search bar are four filter boxes, each with an 'AND' operator and a search field: '"saving energy"', 'railway or train or tram or subway', and 'supercap or ultracap or edlc or "dou"'. Each filter box has a dropdown menu set to 'All Fields'. To the right of the search area is a 'Resources' sidebar with links to follow Scopus on Twitter, access Scopus videos, and learn about alerts and registration. Below the search area are 'Limit to:' options, including 'Date Range (inclusive)' set to 'All years' to 'Present', 'Document Type' set to 'ALL', and 'Subject Areas' with checkboxes for 'Life Sciences (> 4,300 titles)', 'Health Sciences (> 6,800 titles. 100% Medline coverage)', 'Physical Sciences (> 7,200 titles)', and 'Social Sciences & Humanities (> 5,300 titles.)'.

**Registro 3. Ecuación de búsqueda referentes técnicos planeación**

#### 5.1.2.1 Publicaciones científicas

En el Gráfico 16 se puede apreciar las publicaciones científicas producidas a la fecha y acorde a la ecuación de búsqueda ingresada al Scopus.

Las primeras publicaciones científicas fueron en el año 2007 y la mayor producción se presentó en el año 2010 con 13 publicaciones equivalente al 29,5% del total, independiente del tipo o medio en la que fueron publicadas.

El segundo auge de publicaciones científicas se presentó en el año 2013 con 7 publicaciones equivalentes al 16% de la producción total. A la fecha en lo corrido del año 2014 se tienen 4 publicaciones.

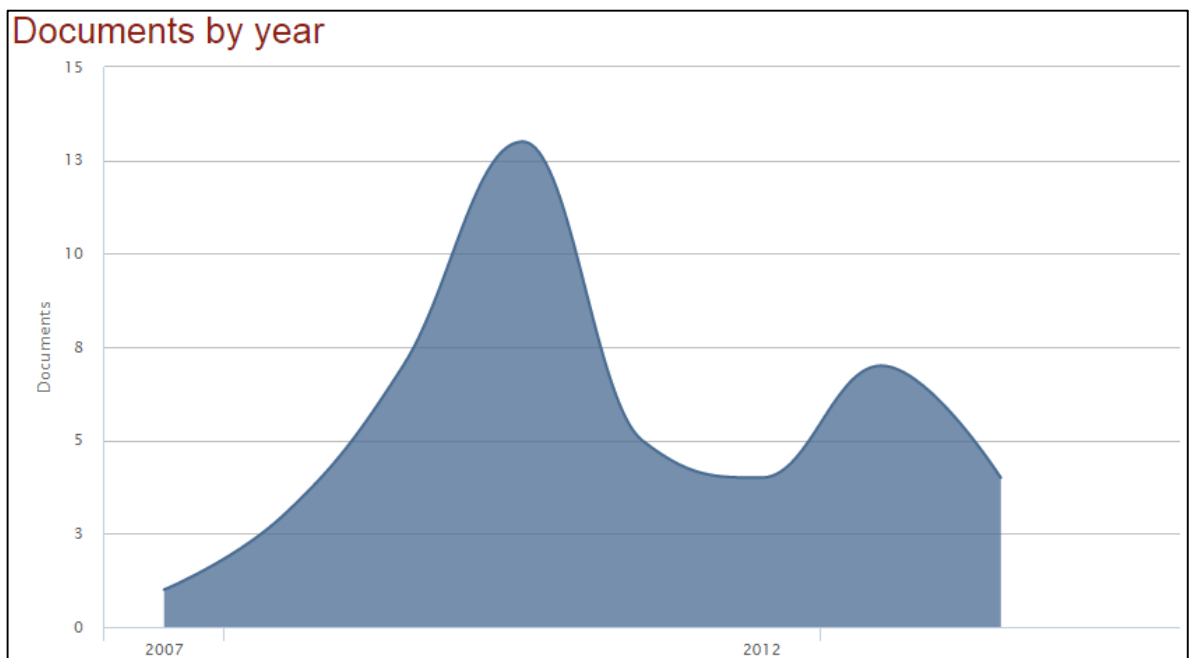


Gráfico 16. Documentos planeación por año

#### 5.1.2.2 Documentos publicados por año y por fuente

En el Gráfico 17 se puede apreciar el comportamiento de las publicaciones por fuente y por año; en el año 2008 *World Electric Vehicle Journal* publicó 2, *Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ) Transaction on Electrical and Electronic Engineering* fue el organismo con mayor cantidad de publicaciones, con 4 documentos en 2010 seguido de la *IEEE Transaction on Industrial Electronics* con 3 publicaciones en el mismo año.

Las demás instituciones publicaron entre 1 y 2 artículos en diferentes años del periodo seleccionado.

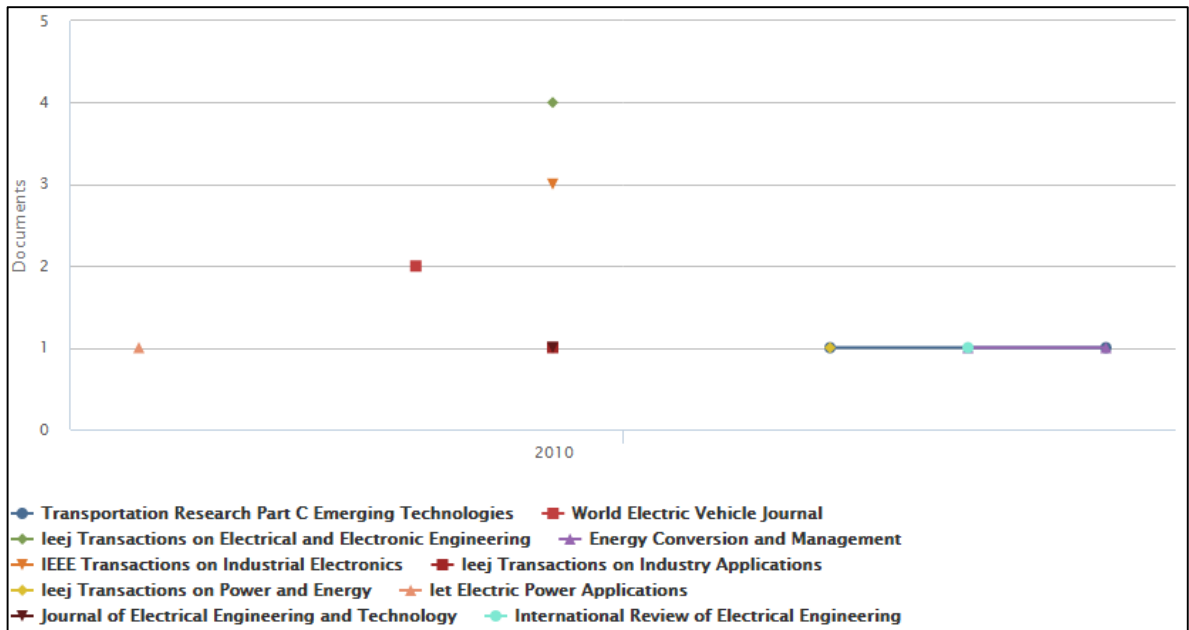


Gráfico 17. Documentos planeación por fuente y por año

### 5.1.2.3 Documentos por autor

En el Gráfico 18 se aprecia la cantidad de documentos producidos por autor.

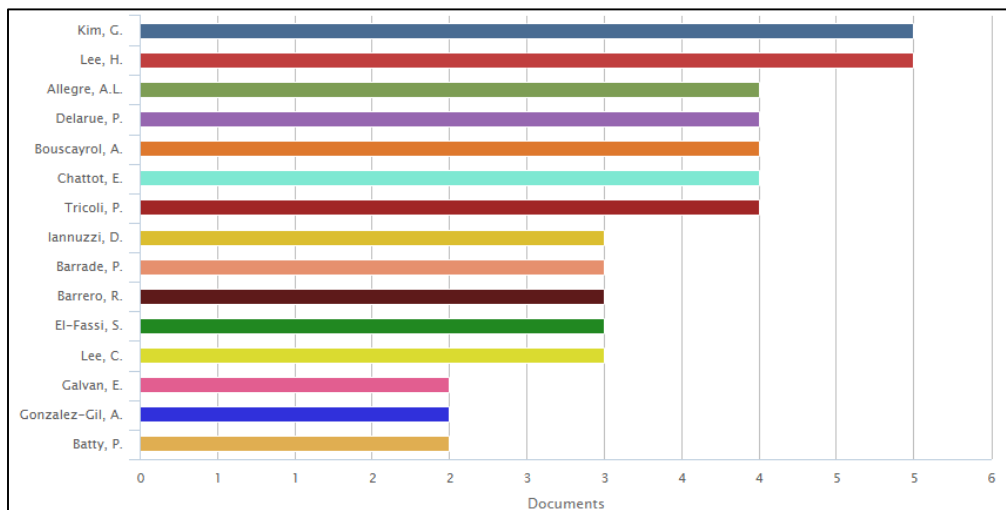


Gráfico 18. Documentos planeación por autor

#### 5.1.2.4 Documentos por afiliación

En el Gráfico 19 se aprecia la cantidad de documentos publicados por afiliación.

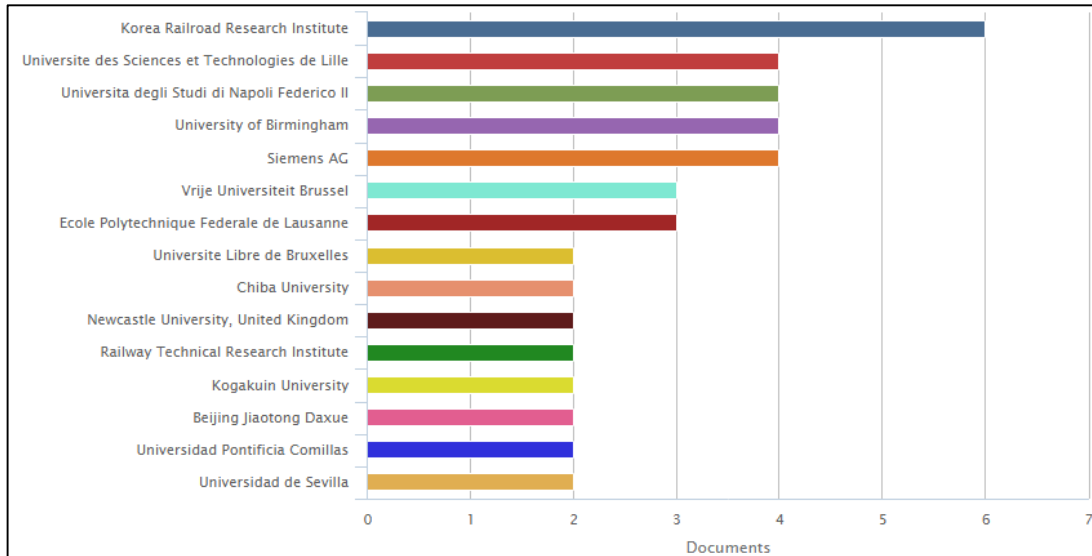


Gráfico 19. Documentosplaneación por afiliación

#### 5.1.2.5 Documentos por país

En el Gráfico 20 se aprecia la cantidad de documentos producidos por país.

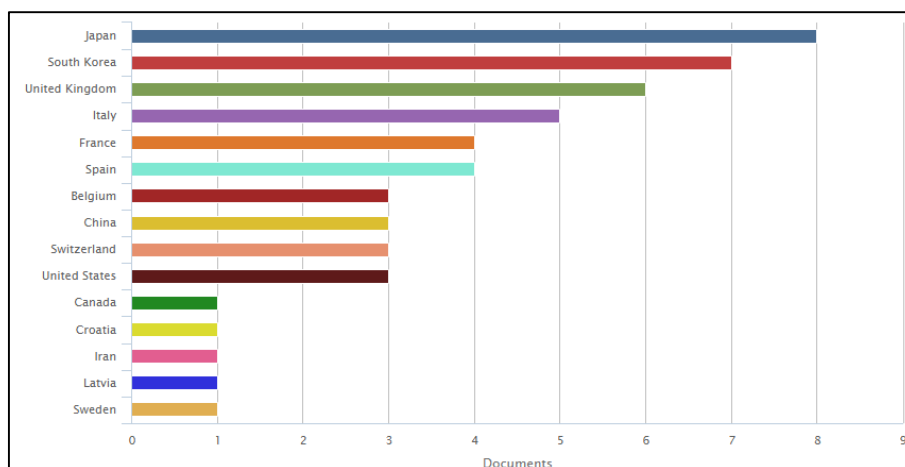


Gráfico 20. Documentosplaneación por país

### 5.1.2.6 Documentos por tipo

En el Gráfico 21 se aprecia la cantidad de documentos por tipo de publicación.

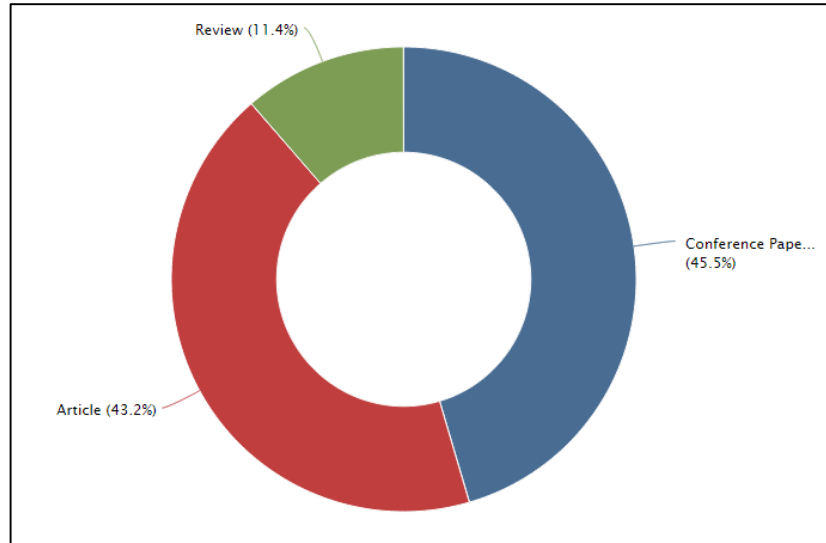


Gráfico 21. Documentos planeación por tipo

### 5.1.2.7 Documentos por área temática

En el Gráfico 22 se aprecia la cantidad de documentos por área temática.

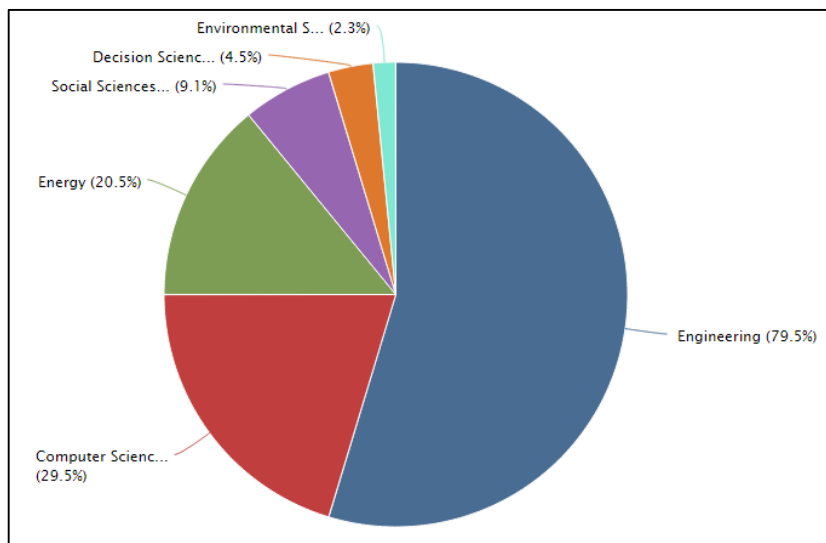


Gráfico 22. Documentos planeación por área temática



### 5.1.2.8 Vigilancia de Patentes

Para la búsqueda de las patentes referentes en los últimos 10 – 15 años sobre planeación de sistemas de suministro de energía de sistemas de transporte eléctrico, se recurrió al *World Intellectual Property Organization (WIPO)* mediante el uso del *International Patent Classification (IPC)* y por medio de palabras claves; la ecuación de búsqueda utilizada se muestra a continuación así como los resultados.

La vigilancia realizada en 5.1.1.8 incluye la búsqueda de patentes para la planeación de sistemas de suministro de energía de sistemas de transporte eléctrico, lo cual se evidencia en patentes, como por ejemplo, *WO/2013/131899ELECTRIC RAILWAY NETWORK AND ASSOCIATED ENERGY EXCHANGE METHOD* y *WO/2013/020212 - ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEM FOR TRACTION POWER SUPPLY*. Sin embargo, se realizaron búsquedas adicionales, lo cual se evidencia en la siguiente ecuación de búsqueda.

The screenshot displays the WIPO PATENTSCOPE search interface. At the top, the WIPO logo and 'PATENTSCOPE' are visible, along with language options: Mobile | Deutsch | Español | Français | 日本語 | 한국어 | Português | Русский | 中文. Below this is the search bar with the query: (ALL:((planning or method) and "power network" and ("double layer" or ultracap or supercap) and (railway or train or tram)))

Navigation tabs include Search, Browse, Translate, Options, News, and Help. The user is identified as 'User: luise.castrillon@alfa.upb.edu.co'. The breadcrumb trail shows 'Home > IP Services > PATENTSCOPE'.

The 'Advanced Search' section includes the following filters:

- Language: English
- Stem:
- Office: All

Geographic filters are listed with checkboxes:

- All
- PCT
- Africa
  - ARIPO
  - Egypt
  - Kenya
  - Morocco
  - South Africa
- Americas
  - United States of America
  - Canada
  - LATIPAT
    - Argentina
    - Brazil
    - Chile
    - Colombia
    - Costa Rica
    - Cuba
    - Dominican Rep.
    - Ecuador
    - El Salvador
    - Guatemala
    - Honduras
    - Mexico
    - Nicaragua
    - Panama
    - Peru
    - Uruguay
- Asia-Europe
  - Bahrain
  - China
  - Eurasian Patent Office
  - Estonia
  - European Patent Office
  - Israel
  - Japan
  - Jordan
  - Russian Federation
  - Russian Federation (USSR data)
  - Singapore
  - Spain
  - Republic of Korea
  - Viet Nam
  - United Arab Emirates

Buttons for 'Search' and 'Reset' are located at the bottom right of the filter section. A 'Tooltip Help' link is at the bottom left.

Registro 4. Ecuación de búsqueda de patentes planeación

Los resultados obtenidos mediante la ecuación de búsqueda del Registro 4, no permitió encontrar patentes diferentes a las encontradas en la búsqueda del Registro 2, por lo que este registro de patentes se considera válido para ambas tópicos de consulta.

## Anexo 1

### Encuesta para referentes técnicos y comerciales de sistemas de compensación cd basados en ultracapacitores.

1. *Do you know railway operators experience about dc voltage?*
2. *Could you say to us how is the performance of the ultracapacitors in relation with the charge and discharge cycle in a dc voltage compensator?*
3. *What are the critical parameters to control in a commissioning of a dc voltage compensator?*
4. *What are the minimum locational conditions must be considered in the installation of aultracapacitor bank?*
5. *What are the factors must be consider in the commissioning of the equipment to get the maximum efficiency of the compensator?*
6. *Do you know about saving substations infrastructure by implementing dc voltage compensators?*
7. *Do you have any reference about the use of dc voltage compensators in the planning studies of power supply systems for electric transportation systems?*
8. *Do you know what has been the evolution of the dc voltage compensator applied in electric transportation systems?*
9. *Would you think the topic of the survey is enough to formulate a research work and qualify for the title of MSc?*
10. *What do you think about the tendency of dc voltage compensators based on ultracapacitors in electric transportation systems?*

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. M. D. E. L. Énergie, P. Gadonneix, Y. D. Kim, K. Meyers, and G. Ward, "World Energy Scenarios," 2013.
- [2] Metro de Medellín, "Monto de la deuda Metro de Medellín," 2014.
- [3] Siemens and Ateinsa, "Manual de Mantenimiento Metro de Medellín - Sistema de Mando y Control." 1995.
- [4] Siemens and Ateinsa, "Manual de Mantenimiento Metro de Medellín - Sistema de Tracción." 1995.
- [5] M. Melis Maynar and F. J. González Fernández, *Ferrocarriles Metropolitanos: Tranvías, metros ligeros y metros convencionales*, 3rd ed. España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008.
- [6] J. Ciro Parra, "Emisiones-de-Dióxido-de-Carbono-de-las-plantas-de-generación-despachadas-centralmente-en-Colombia-durante-2013 - All Documents," <http://www.xm.com.co>, 2014. [Online]. Available: <http://www.xm.com.co/Hojas de Vida/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=/Hojas de Vida/Pages/Emisiones-de-Dióxido-de-Carbono-de-las-plantas-de-generación-despachadas-centralmente-en-Colombia-durante-2013&FolderCTID=0x01200060652AAE2EE77945A85198F7E97D73FE>. [Accessed: 20-Nov-2014].
- [7] P. Barrade, "Energy storage and applications with supercapacitors," *ANAE Assoc. Naz. Azionamenti Elettr. ...*, 2003.
- [8] L. Battistelli, M. Fantauzzi, D. Iannuzzi, and D. Lauria, "Energy management of electrified mass transit systems with Energy Storage devices," *Int. Symp. Power Electron. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 1172–1177, Jun. 2012.

- [9] A. Capasso, M. C. Falvo, U. Grasselli, R. Lamedica, R. Bartoni, M. Francisi, and G. Maranzano, "A planning study on power systems of metro-transit transportation system," *2008 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 1027–1032, Jun. 2008.
- [10] S. D'Avanzo, D. Iannuzzi, F. Murolo, R. Rizzo, and P. Tricoli, "A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit," *Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls.*, pp. 1–7, Oct. 2010.
- [11] X. del T. García, "Ultracapacitor-based storage: Modelling, power conversion and energy considerations," ... (*ISIE*), *2010 IEEE ...*, no. 2, pp. 2493–2498, 2010.
- [12] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art," *Veh. Technol. IEEE Trans.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [13] T. Konishi, S. Hase, and Y. Nakamichi, "Verification tests of energy storage system for DC electrified railways using EDLC," *Q. Rep. RTRI*, vol. 48, no. 2, pp. 71–77, 2007.
- [14] H. Lee, G. Kim, and C. Lee, "Development of ESS for Regenerative Energy of Electric Vehicle Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee," 2008.
- [15] H. Lee, G. Kim, C. Lee, and E. Joung, "Field Tests of DC 1500 V Stationary Energy Storage System," *Int. J. Railw.*, vol. 5, no. 3, pp. 124–128, Sep. 2012.
- [16] J. Locker and T. Wolfe, "Development of an Ultracapacitor-Based Intermediate Energy Storage System," *Pulsed Power Conf. 2005 IEEE*, pp. 1337–1340, 2005.
- [17] J. Morand, D. Bergogne, and P. Venet, "An energy saver for tramway networks using double active bridge and supercapacitors," ... (*EPE*), *2013 15th ...*, 2013.
- [18] I. Szenasy, "Improvement the energy storage with ultracapacitor in metro railcar by modeling and simulation," *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, Sep. 2008.

[19] Maxwell Technologies Inc., "Charging of Ultracapacitors," 2005.