

Las fuentes de novedad inventiva en las baterías de plomo-ácido de los vehículos eléctricos

Sources of inventive novelty in electric vehicle lead-acid batteries

Arturo Lara Rivero^I, Guadalupe Jaimes Gutierrez^{II} y Ricardo Artemio Chávez Meza^{III}

Fecha recepción 20 septiembre de 2022. fecha de aceptación 16 de diciembre de 2022.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es, desde la teoría de los sistemas complejos (Arthur, 2009), reconstruir de manera cuantitativa y cualitativa la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido utilizadas en vehículos eléctricos. A partir de la información de la base de datos de la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos (USPTO) y la metodología desarrollada por Strumsky y Lobo (2015) es posible representar diferentes grados de novedad inventiva, así como medir la creciente complejidad tecnológica de las baterías de plomo-ácido. La evidencia muestra que la batería de plomo-ácido es una tecnología cada vez más compleja. Es una tecnología rival pero también, complementaria a las baterías de níquel-metal-hidruro y de iones de litio utilizadas por los vehículos eléctricos e híbridos.

Palabras clave: Patentes, Clases Tecnológicas, Invención, baterías, Vehículos Eléctricos

Código JEL: B52, C18, D85, O31, O34

Abstract

The main objective of this paper is, based on the theory of complex systems (Arthur, 2009), to reconstruct the inventive activity of lead-acid batteries used in electric vehicles. Based on the information from the United States Patent and Trademark Office (USPTO) database, and based on the methodology developed by Strumsky and Lobo (2015), it is possible to represent different degrees of inventive novelty (origination, new combination, recombination and reuse), as well as measuring the increasing technological complexity of lead-acid batteries. Evidence shows that the lead-acid battery is an increasingly complex technology. It is a rival technology but is also complementary to the nickel-metal-hydride and lithium-ion batteries used by electric and hybrid vehicles.

Keywords: Patents, Technological Classes, Invention, Batteries, Electric Vehicles

JEL Code: B52, C18, D85, O31, O34

• • • • •

I Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Departamento de Producción Económica, alararivero35@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9699-4393>

II Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Departamento de Producción Económica, lupoxa@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1646-1111>

III Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Departamento de Producción Económica, rchavez@correo.xoc.uma.mx
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7902-865X>

Introducción¹

Durante el siglo XX la batería de plomo-ácido se convirtió en el diseño dominante en la industria automotriz por su bajo costo, seguridad y nivel de desempeño (Pistoia, 2008; Garche *et al.*, 2015; Moseley *et al.*, 2017). Sin embargo, ante la emergencia de los vehículos eléctricos² las baterías de plomo-ácido diseñadas para vehículos de combustión interna enfrentan un conjunto de nuevos requerimientos en términos de funcionalidad, ciclo de vida, costo de diseño, desarrollo y producción (Broussely, 2007; Pistoia, 2010; Pavlov, 2011; Mosely *et al.*, 2017). En estas limitaciones tecnológicas y económicas se encuentra el origen de la sustitución de las baterías plomo-ácido por baterías de iones de litio (Li-Ion) y de níquel-hidruros-metálicos (NiHM) (Meissner y Richter; 2005; Pistoia, 2008) dirigidas al mercado de los vehículos eléctricos

¿Cómo reconstruir la evolución de la tecnología de las baterías de plomo-ácido? Existe una variedad de modelos y conceptos desarrollados para el estudio de la evolución tecnológica. Por razones de espacio, en este trabajo³ solo se revisa y delimita la controversia teórica de dos enfoques:

i) La evolución de la tecnología como variación de las formas exteriores de los artefactos. El primer enfoque, construido a partir de analogías de la selección natural propuesto por Charles Darwin, es la del historiador George Basalla (1988). Establece que el “artefacto” es la unidad de análisis primario y que el “exterior” de la tecnología, equivalente al fenotipo en la biología, es el centro del objeto de estudio. Lo que le condujo a interpretar la evolución de la tecnología como un evento de desarrollo gradual, donde la novedad se interpreta como resultado de pequeñas mejoras continuas, que suponen modificaciones deliberadas o descubrimientos no planeados, que generan variaciones en las características físicas de las tecnologías previas y están sujetas a la selección de las más aptas. (Butler, 1863; Gilfillan, 1935 ^{a, b}; Basalla, 1988). De acuerdo con este enfoque, es posible establecer una especie de herencia con relación a las características físicas de las tecnologías, que se interpreta como la tendencia de las nuevas tecnologías a parecerse a las anteriores y que permite trazar una línea del descenso de la forma (Basalla, 1988; Brey, 2008). Este enfoque se refiere, principalmente, a la complejidad tecnológica como resultado de la integración de partes físicas y su creciente diferenciación en la estructura sin especificar el contenido exacto de aquella complejidad. De manera que, por ejemplo, cuando se analizan las patentes desde esta perspectiva, los casos bajo estudio se reducen a ejemplos concretos que no permiten establecer los mecanismos ni propiedades que subyacen a la evolución de la tecnología en particular (Hall *et al.*, 2000, 2001; Youtie *et al.*, 2008).



- 1 Agradecemos las valiosas recomendaciones de nuestros dos dictaminadores anónimos.
- 2 Excepto cuando se distinguen distintas arquitectura de vehículos (eléctricos o híbridos), se utiliza la categoría de vehículo eléctrico como una categoría amplia que incluye la diversidad de vehículos eléctricos.
- 3 En otros trabajos se ha revisado la literatura sobre cambio tecnológico y recombinación con mayor detalle. (Strumsky y Lobo, 2015)



ii) **La evolución de la tecnología como captura y recombinación de fenómenos naturales.** Brian Arthur (2009) plantea por su parte que la naturaleza de la evolución tecnológica radica en la recombinación de fenómenos naturales. A este nivel la evolución de la tecnología es no-darwiniana. Los fenómenos son la unidad de información y su gramática profunda. Los fenómenos rara vez pueden explotarse de forma cruda. Utilizarlos **requiere encapsularlos** en dispositivos físicos, que en conjunto con otros componentes, permitan crear una arquitectura de trabajo. Esta arquitectura tiene una estructura: *modular*, en el sentido de que cada grupo de componentes explotan un dominio, conformado por alguna(s) familia(s) de fenómenos; *jerárquica*, donde los distintos componentes o módulos están vinculados a funciones centrales y complementarias (proteger y regular los dispositivos, suministrar energía o realizar otras tareas); y, *anidada*, donde los componentes tecnológicos están interconectados, interactúan y se comunican entre sí (el *output* de uno es el *input* de los otros) y trabajan de manera coordinada para alcanzar un propósito común, realizando cada uno de ellos una tarea necesaria. Esta cadena de interacciones afecta a toda la arquitectura (Holland, 1992), en el sentido de que los cambios en un nivel implican cambios en los otros para reconfigurar y adaptar así los propósitos centrales y complementarios. (Arthur, 2009)

Desde la perspectiva de Arthur la recombinación de fenómenos naturales es un proceso que vincula un propósito con un principio y los encapsulan en una arquitectura que, por medio de múltiples componentes, ejecuta funciones. De esta manera, la complejidad en una tecnología (particular) tiende a aumentar a medida que se agregan funciones y modificaciones a sus estructuras. Y en la medida que su arquitectura de trabajo combina una mayor diversidad de componentes, que orquestan distintos fenómenos, la tecnología se adapta a circunstancias excepcionales o a un mundo más complejo (Arthur, 2007). La complejidad de los sistemas tecnológicos depende así, tanto del número de componentes como de las interacciones resultantes (Kauffman, 1993).

El enfoque de recombinación de fenómenos naturales propuesto por Arthur (2009) ha contribuido en especial a representar de manera novedosa la naturaleza y evolución de la tecnología. Desde esta perspectiva teórica, este trabajo busca representar la evolución de la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido utilizadas por los vehículos eléctricos, combinando indicadores cuantitativos (patentes) con hechos estilizados. Para ello, se utiliza la información de la base de datos de la Oficina de Marcas y Patentes de los Estados Unidos (USPTO) y la metodología desarrollada por Strumsky *et al.* (2011, 2015). De este modo, se describe de manera cuantitativa la actividad inventiva y la complejidad tecnológica relacionada con 902 patentes de plomo-ácido para el periodo 1981-2013.⁴ Este trabajo contribuye al estudio de la evolución tecnológica estableciendo un puente entre la teoría de la invención de Brian Arthur (2009), la “taxonomía de la novedad” (Strumsky *et al.*, 2011, 2015) y el caso concreto de las baterías de plomo-ácido de los vehículos eléctricos⁵.....

4 El sistema de Clasificación de Patentes de Estados Unidos (USPC) estuvo vigente hasta 2015, cuando la *United States Patent and Trade mark Office (USPTO)* decidió cambiar al sistema de clasificación Cooperativo. Este hecho impacta en los datos, y puesto que las patentes de la USPTO dejaron de ser clasificadas con el sistema USPC desde el año 2013 la evidencia aquí presentada se limitará hasta ese año.

5 Estas patentes han sido registradas en la USPTO, por empresas, instituciones públicas y privadas, que residen en EU, así como por empresas y organizaciones públicas y privadas extranjeras. Existen diferencias significativas en los patrones de patentamiento a nivel sectorial, nacional y regional, lo que limita la comparación internacional. Aunque hay una tendencia a nivel internacional a la convergencia en las formas sobre cómo se clasifica la actividad inventiva, cada país tiene sus políticas para aceptar o rechazar una invención. A pesar de estas limitaciones se considera, siguiendo a Dosi, Pavitt y Soete (1990), que la información contenida en la USPTO representa bastante bien la actividad inventiva a escala global.



Las preguntas que guían este trabajo son: 1) ¿Cuál es la participación de las baterías de plomo-ácido en la actividad inventiva del total de baterías diseñadas para los vehículos de energía alternativa?; 2) ¿Cuáles son los factores que explican la creciente complejidad tecnológica de las baterías de plomo-ácido?; 3) ¿Cómo medir esa mayor complejidad? y 4) ¿Cuáles son los principales tipos de novedad que caracterizan la evolución tecnológica de la batería de plomo-ácido? ¿Las nuevas baterías están substituyendo a la vieja y madura tecnología de las baterías de plomo-ácido?

Para responder estas preguntas, el trabajo se organiza de la siguiente forma. En la primera sección se describe cómo la información contenida en las patentes permite cuantificar tanto la complejidad tecnológica como identificar, a partir de la taxonomía de Strumsky *et al.* (2011, 2015), los diversos tipos de novedad inventiva. En la segunda sección, se compara – utilizando las patentes de la USPTO, la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido (PA) respecto a las baterías avanzadas (litio y níquel) utilizadas por los vehículos eléctricos (VE). En la tercera, se muestran los principales hallazgos sobre los cambios en la complejidad de las baterías de plomo-ácido y se presentan algunas explicaciones de ello. Finalmente se presentan las conclusiones.

Clases tecnológicas, complejidad y tipos de novedad

La información contenida en las patentes puede servir para múltiples propósitos, en particular, permiten medir la actividad inventiva en general (Griliches, 1990; Jaffe *et al.*, 1993, 2002, 2006). Pero, para identificar los tipos de novedad inventiva y su complejidad, se necesita una unidad discreta: la clase tecnológica.

En Estados Unidos, las tecnologías patentadas son identificadas por medio de un sistema numérico de clases, el sistema de Clasificación de Patentes de Estados Unidos (USPC) que, por mandato legal, proporciona una referencia exhaustiva de todos los temas patentables y está sujeto a revisión periódica.⁶ Es conveniente el uso de las clases como unidades de análisis para medir y caracterizar la complejidad y tipo de la actividad inventiva, en particular porque se trata de un sistema de clasificación refinado y actualizado por distintas generaciones de expertos evaluadores que identifican, sin los sesgos de las estrategias asociadas a los derechos de propiedad, la emergencia, crecimiento y diversificación de los campos tecnológicos. En contraste, los estudios de patentes tratados como casos o ejemplos resultan ser más descriptivos y teóricamente reduccionistas.

Las clases tecnológicas del USPC se componen por un par de códigos conocidos como clase principal y subclase.⁷ Las clases indican características específicas de conocimiento y los examinadores de patentes las combinan para generar una descripción completa. En este sentido, las clases indican capacidades, fronteras y complejidades de una tecnología y establecen, de manera

.....

- 6 El sistema de Clasificación de Patentes de Estados Unidos (USPC) estuvo vigente hasta 2015, cuando la *United States Patent and Trade mark Office (USPTO)* decidió cambiar al sistema de clasificación Cooperativo. Este hecho impacta en los datos, y puesto que las patentes de la USPTO dejaron de ser clasificadas con el sistema USPC desde el año 2013 la evidencia aquí presentada se limitará hasta ese año.
- 7 Por ejemplo, la patente 4656706 tiene cuatro clases (429/228, 423/619, 29/2 y 205/63). La primera clase (429/228) tiene como clase principal a la 429 que se refiere al conjunto de la “química: aparato, producto y proceso de producción de corriente eléctrica” y como subclase a la 228 que se refiere a las “celdas, elementos, subcombinaciones y composiciones para electrodos con material electroquímicamente inorgánico que contienen óxido de plomo”.



empírica, el grado de novedad de una tecnología⁸ (Strumsky *et al.*, 2010_b).

Las clases pueden ser utilizadas para medir la complejidad de las invenciones. El grado de complejidad, de acuerdo con Kolmogorov (1968), Gell-Mann (1994) y Holland (1992, 1995) puede entenderse como la longitud mínima necesaria de una secuencia de símbolos o palabras que describen un proceso o resultado. Así, una invención será simple si el número de clases que describe su funcionamiento o proceso es pequeño y será compleja en tanto que, para describir su proceso o propiedades, requiera de un número grande de clases.

Por otro lado, Strumsky *et al.*, (2011, 2015) han desarrollado una taxonomía, con base en las clases tecnológicas y sus combinaciones binarias resultantes para caracterizar la novedad tecnológica de una patente en cuatro categorías:⁹

1. **Originación:** Todas las clases de la patente son nuevas y, por lo tanto, sus combinaciones binarias resultantes también lo son.
2. **Nueva combinación:** La patente contiene por lo menos, una clase tecnológica nueva y, en consecuencia, hay combinaciones binarias nuevas con esa clase.
3. **Recombinación:** La patente contiene combinaciones binarias nuevas generadas con clases utilizadas previamente en otras patentes.
4. **Reutilización:** Todas las clases de la patente y sus combinaciones binarias han sido previamente utilizadas en otras patentes.

Con base en estos dos indicadores se representa la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido, su complejidad y los tipos de novedad que se observan entre 1981 y 2013.

Actividad inventiva en las baterías para vehículos eléctrico

Las empresas del sector automotriz han explorado diversos materiales –níquel-cadmio (NiCd), níquel-hidruros-metálicos (NiMH) y iones de litio (Li-ion)– como alternativa a las baterías de plomo-ácido (PA). Una forma de captar los esfuerzos inventivos y la transición a nuevos y más sofisticados sistemas de almacenamiento de energía demandados por los vehículos eléctricos es observar la evolución en el número de patentes para cada tipo batería¹⁰.

8 En el marco de los SCA se puede incluir la metodología de Fleming y Sorenson (2001) que examina la recombinación tecnológica a partir del uso de las clases y las citas de patentes. Su estudio es pionero, sin embargo, el indicador que utiliza sesga sus resultados. Las citas son incluidas por los inventores –y sus abogados– como parte de su estrategia para reivindicar derechos de propiedad (Bessen y Meurer, 2008). Por ello, no es una unidad de análisis apropiada. Con las clases este sesgo no existe toda vez que el propósito del USPC es el de clasificar, desde el punto de vista ingenieril y/o científico, la actividad inventiva. Las clases no están vinculadas a reglas de propiedad y esto las vuelve un indicador robusto para el estudio de la tecnología. Sin embargo, se han explotado relativamente poco las excepciones son Hall et al. (2001); Moser y Nicholas (2004).

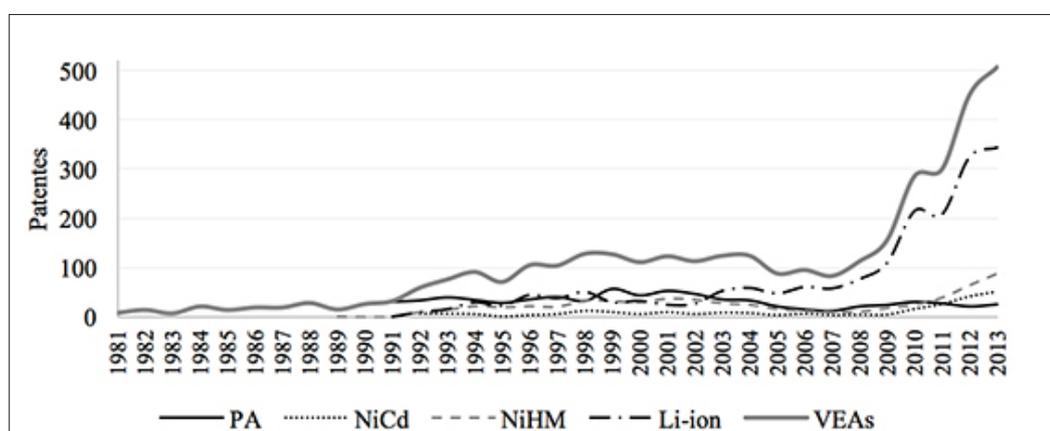
9 En el Anexo 1, se describe la metodología que permite construir estas cuatro categorías.

10 La base de datos utilizada se construyó de la siguiente manera. Del Derwent World Patents Index (DWPI) se usaron los campos de búsqueda: Plomo-ácido: X16-B01B, Níquel-Cadmio: X16-B01A1, Níquel-Hidruros Metálicos: X16-B01A3, Litio-ion: X16-B01F1, Vehículos Eléctricos: X21, Electricidad automotriz: X22. Se obtuvo un total de 9,413 patentes. Esta información corresponde a familias de patente, así, de las patentes obtenidas se seleccionaron las correspondientes a la USPTO. Se obtuvieron 3888 patentes otorgadas entre el 30/12/1980 y el 26/08/2014. Para contar con datos para años completos, se consideran 3638 patentes, las otorgadas entre el 01/1981 y el 12/2013. Cabe señalar que, aunque estas clases corresponden a los vehículos eléctricos pueden incluir vehículos de tracción pequeños que utilizan baterías, como los terapéuticos (sillas de ruedas eléctricas) o juguetes (montables o de control). Éstos no se eliminan porque: a) la base estaría sesgada, con un criterio diferente y subjetivo al que se usó para



En la Gráfica 1 se observa un incremento general de la actividad inventiva en las baterías para vehículos eléctricos. Si se analiza en tres periodos de la misma magnitud se aprecia que de 1981 a 1991, se registran en promedio 18 patentes por año, en total 203, de las que el 98.5% (200) son de PA. De 1992 a 2002, el promedio es de 100 patentes, con un total de 1108, el porcentaje de baterías de PA se reduce a 39.5%, por su parte, las patentes de Li-ion, NiHM y NiCd representan el 29.6%, 25% y 5.8% respectivamente. Y de 2003 a 2013, el promedio anual de patentes es de 211, alcanzando un total de 2727 donde el 66.8% son de Li-ion, el 14.4% de NiMH, el 11.3% de PA y el 7.3% de NiCd. (Cf. Cuadro I).

GRÁFICA 1. NÚMERO DE PATENTES PARA BATERÍAS AVANZADAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, POR TIPO DE MATERIAL ACTIVO



FUENTE: BASE DE DATOS DE LA USPTO. ELABORACIÓN PROPIA.

CUADRO 1: CANTIDAD Y PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, POR TIPO DE MATERIAL ACTIVO Y PERÍODOS

Material	1981-1991	1992-2002	2003-2013	1981-2013 (Total)
PA	200 (98.5 %)	438 (39.5 %)	264 (11.3 %)	902 (24.7 %)
NiCd	-	65 (5.8 %)	171 (7.3 %)	236 (6.4 %)
NiHM	2 (0.98 %)	277 (25.0 %)	336 (14.4 %)	615 (16.9 %)
Li-ion	1 (0.49 %)	328 (29.6 %)	1 556 (66.8 %)	1 885 (51.8 %)
Baterías (Total)	203 (5.58%)	1 108 (30.46%)	2 327 (63.96%)	3 638 (100%)

FUENTE: BASE DE DATOS USPTO. ELABORACIÓN PROPIA.

Así, en el primer periodo el diseño dominante es la batería de PA. Durante el segundo periodo (1992-2002) la participación de las baterías de PA se reduce, entre otras razones, por sus limitaciones de energía y potencia. Es por ello que, en este período emergen nuevos materiales que intentan satisfacer los requerimientos de los VE. La explosión del último periodo se explica principalmente por el crecimiento de las patentes de baterías de Li-ion que contrasta con la reducida actividad inventiva de las baterías PA.

construirla y; b) se descartaría la posibilidad de observar relaciones entre este tipo de productos y los de la industria automotriz.

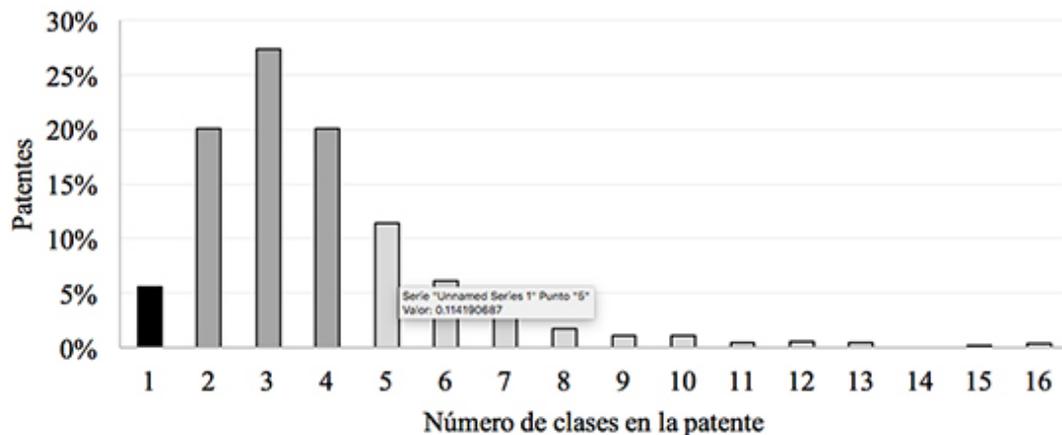


Westbrook (2001) y Moseley *et al.* (2004) consideran que las baterías de PA son tecnologías obsoletas. Sin embargo, aun cuando durante los treinta y tres años que comprende el estudio han perdido participación, las baterías de PA mantienen una actividad inventiva significativa. ¿Cuáles son los posibles factores que explican su persistencia? ¿Esta persistencia se relaciona con un incremento en su complejidad? La siguiente sección trata sobre esto.

Evolución de la complejidad tecnológica de las baterías de plomo-ácido (PA)

Una primera forma de identificar la complejidad de las patentes es observando los porcentajes de patentes de acuerdo con su número de clases (Gráfico 2). De las 902 patentes que integran el total de nuestra muestra, cada una contiene entre 1 y 16 de clases. Este rango es, en sí mismo, significativo ya que, siguiendo a Page (2011), en el proceso combinatorio la diversidad y la complejidad son fenómenos concomitantes: “sin diversidad no es posible observar mucha complejidad; pero sin complejidad, la diversidad se convierte en mera variación sobre la media” (Page, 2014, p.268). Se observa que sólo una pequeña fracción (5.6%) de las patentes (50) cuentan con una única clase tecnológica, mientras que el 64.7% tienen entre dos y cuatro clases.

GRÁFICO 2. PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, POR NÚMERO DE CLASES (1981-2013)



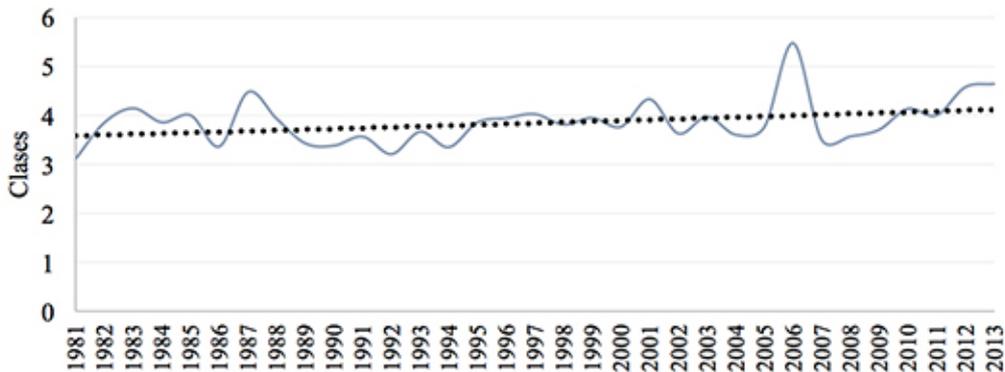
FUENTE: BASE DE DATOS USPTO. ELABORACIÓN PROPIA.

Conviene ahora, observar la evolución del número de clases por periodo. El promedio anual de las clases tiene una tendencia ligeramente creciente (Cf. Gráfico 3). Durante todo el periodo (1981-2013) el promedio es de 3.86 clases. Sin embargo, el promedio esconde diferencias significativas. La proporción de patentes según el número de clases cambia durante el período de análisis (Cf. Gráfico 4 y Cuadro II). Desde el punto de vista de su peso relativo, las patentes con mayor crecimiento son aquellas con 5 o más clases. Durante 1981-1991 éstas representan el 22.5% (45 patentes), en tanto que en el 2003-2013 llegan al 33% (87 patentes).



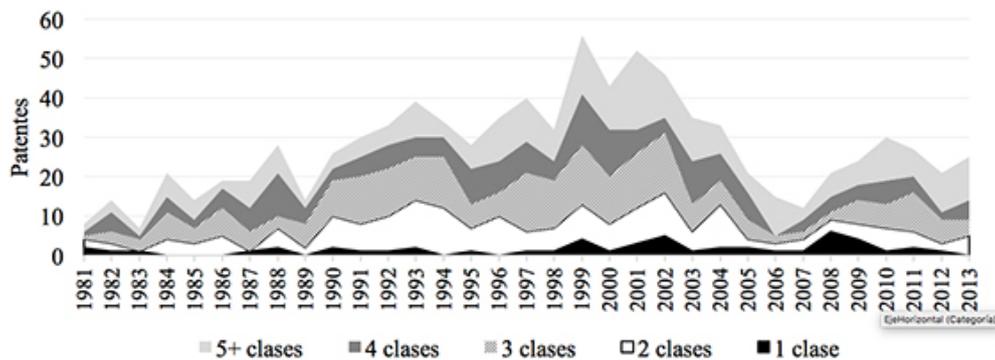
Los datos revelan que conforme avanza la actividad inventiva, las patentes combinan cada vez un número mayor de clases. Las patentes con 4 clases o más, en el último periodo contribuyen con el 53% de la actividad inventiva, en tanto que el primer y segundo período representan el 46% y 43.7% respectivamente.

GRÁFICO 3. PROMEDIO ANUAL DEL NÚMERO DE CLASES DE LAS PATENTES DE PLOMO-ÁCIDO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS



FUENTE: BASE DE DATOS USPTO. ELABORACIÓN PROPIA.

GRÁFICO 4. NÚMERO DE PATENTES DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, POR NÚMERO DE CLASES



FUENTE: BASE DE DATOS USPTO. ELABORACIÓN PROPIA.

¿Por qué las baterías de PA para los vehículos eléctricos son sistemas cada vez más complejos? Desde el punto de vista de la naturaleza de la tecnología (Arthur, 2009) se identifican los siguientes factores: a) el descubrimiento de un conjunto cada vez más diverso y profundo de fenómenos y principios científicos aplicados a las baterías de plomo-ácido (Gou, 2020); b) la convergencia e interacción de dominios tecnológicos antes separados (mecatrónica, electroquí-



mica, y nanotecnología) (Hockfield, 2020; Watson, 2016); c) diseños más complejos de componentes electrónicos, sensores y microcomputadoras para administrar la energía de la batería (Garche et al., 2015); y, d) la emergencia de requerimientos de distintos nichos de mercado que exigen desempeño y funciones cada vez más diferenciadas (Schallenberg, 1982; Pistoia, 2010; Eurobat, 2016).

CUADRO II. NÚMERO Y PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, POR NÚMERO DE CLASES

Clases	1981-1991	1992-2002	2003-2013	1981-2013 (Total)
1 clase	10 (5.0%)	19 (4.3%)	21 (8.0%)	50 (5.5 %)
2 clases	38 (19.0%)	96 (21.9%)	47 (17.8%)	181 (20.1%)
3 clases	60 (30.0%)	131 (29.9%)	56 (21.2%)	247 (27.4%)
4 clases	47 (23.5%)	81 (18.4%)	53 (20.1%)	181 (20.1%)
5+ clases	45 (22.5%)	111 (25.3%)	87 (32.9%)	243 (26.9%)
Baterías de PA (Total)	200 (22.17%)	438 (48.56%)	264 (29.27%)	902 (100%)

FUENTE: BASE DE DATOS DEL A USPTO. ELABORACIÓN PROPIA.

A su vez la diversidad de nichos de mercado está empujando la trayectoria tecnológica de las baterías en tres direcciones. La primera se deriva del hecho de que los vehículos eléctricos e híbridos requieren de una batería auxiliar avanzada¹¹ para alimentar de energía a sus sistemas de infoentretenimiento y seguridad (Westbrook; 2001). Estas baterías son más complejas a la relativamente simple tecnología convencional de plomo-ácido (Chumchal y Kurzweil, 2017). La segunda dirección que explica el aumento en la complejidad de las baterías de plomo-ácido es su uso como baterías de tracción para los microvehículos monoplaza y biplaza menores de 1000 kilos (Garche y Moseley, 2017).¹² Y la tercera, se asocia con las interacciones cada vez más complejas de las baterías con los nuevos sistemas de los vehículos como los frenos regenerativos o el sistema *Start-Stop*, entre otros (Eurobat, 2016).

Desde esta perspectiva, y como resultado de la mejora de los materiales de las baterías, así como de la integración de numerosos y sofisticados componentes eléctrico/electrónicos, como microcomputadoras –que le permiten a la batería comunicarse con otros sistemas de un vehículo– las baterías se han convertido en un subsistema tecnológico más complejo. ¿De qué manera se puede representar cuantitativamente la naturaleza de esta transformación?

.....

11 Las principales baterías avanzadas son: Valve Regulated Lead Acid (VRLA); Enhanced Flooded Batteries (EFB), Gel battery (GB) y Absortion Glass Mat (AGM). Estas dos últimas son derivaciones de la batería VRLA (May et al., 2005).

12 Aunque se han utilizado diversas tecnologías, este nicho ha sido cubierto principalmente por las baterías de VRLA, debido a que el rango limitado y la vida útil relativamente corta de la batería se compensa con su bajo costo (National Research Council, 2013).



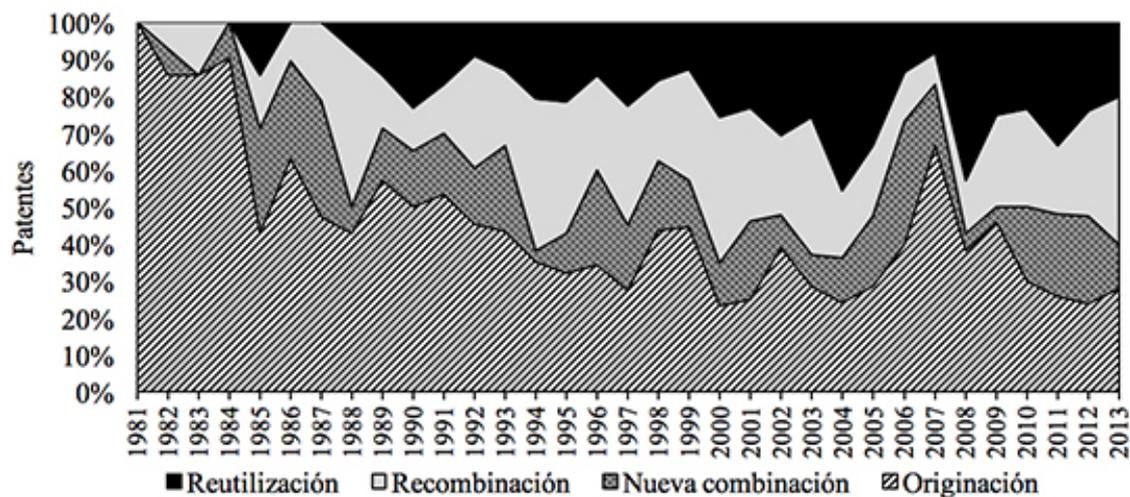
Tipos de novedad inventiva en las baterías de plomo-acido para los vehículos eléctricos

Una vez examinada la creciente complejidad de las baterías de plomo-ácido, es pertinente determinar si ésta es resultado de un proceso de recombinação de conocimientos y capacidades existentes o si se trata de un desarrollo original y novedoso.

Con base en la taxonomía Strumsky *et al.* (2011) se describe la evolución de los tipos de novedad inventiva de las baterías de plomo-ácido (Cf. Gráfico 5). Se identifican dos tendencias opuestas y significativas. La proporción de las patentes de originación es cada vez menor, pasa del 60.5% en el primer periodo (1981-1991) al 32.2% en el último periodo (2003-2013).

Esto parece ser normal en el ciclo de vida de una tecnología puesto que al inicio se espera un mayor número de patentes de originación (la tecnología es novedosa) y con el tiempo se espera una mayor frecuencia de patentes de reutilización, los nuevos desarrollos aprovechan los conocimientos y capacidades adquiridos previamente. Sin embargo, destaca que la originación se mantiene en los tres periodos como la principal fuente de novedad (Cf. Cuadro III) pese al esperado desplazamiento de la batería de plomo-acido por otro tipo de baterías.

GRÁFICO 5. PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO POR TIPO DE NOVEDAD INVENTIVA



FUENTE: BASE DE DATOS DEL A USPTO. ELABORACIÓN PROPIA

Por su parte, las patentes de recombinação y de reutilización ganan importancia, pasan de 24% en el primer periodo al 52.6% en el último periodo. Con base en estos patrones se puede afirmar que la actividad inventiva se está reconfigurando, impulsando formas de invención menos novedosas y un mayor aprovechamiento de los bloques de construcción preexistentes. En conjunto, estos resultados pueden considerarse como expresión del proceso de evolución de las baterías de plomo-ácido convencionales a baterías más avanzadas.



Con este análisis se muestra que la novedad se mantiene durante todo el periodo. La originación es importante porque posibilita abrir nuevos nichos de oportunidad que resulta en mejores y nuevas combinaciones y, a su vez, en combinaciones más complejas.¹³ Una vez que se ha examinado cómo en las últimas tres décadas ha evolucionado la actividad inventiva relacionada con las baterías de PA, es necesario describir los principales hechos estilizados de cada periodo.

CUADRO III: NÚMERO Y PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Tipo de novedad	POR TIPO DE NOVEDAD			
	1981-1991	1992-2002	2003-2013	1981-2013 (Total)
Originación	121 (60.5%)	156 (35.6%)	85 (32.2%)	362 (40.1%)
Nueva combinación	31 (15.5%)	67 (15.3%)	40 (15.1%)	138 (15.3%)
Recombinación	31 (15.5%)	131 (29.9%)	64 (24.2%)	226 (25.1%)
Reutilización	17 (8.5%)	84 (19.2%)	75 (28.4%)	176 (19.5%)
Baterías de PA (Total)	200 (22.1%)	438 (48.6%)	264 (29.3%)	902 (100%)

FUENTE: BASE DE DATOS DE LA USPTO. ELABORACIÓN PROPIA.

Periodo 1981-1991: Desde el punto de vista de los vehículos convencionales, la batería de plomo-ácido es el diseño dominante, una tecnología madura, que tiene más de un siglo en el mercado. Sin embargo, el uso de éstas como baterías de tracción es muy reciente. Durante estos años se observa una relativamente escasa actividad inventiva (en este periodo sólo se registraron 200 patentes) y una moderada complejidad, medida por el promedio de clases (Cf. Cuadro II). La actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido durante este período, se asocia con el esfuerzo para resolver las deficiencias funcionales de estas baterías (peso, capacidad de carga, ciclos de vida, etc.). Se busca, con escaso éxito, expandir el rendimiento de las baterías convencionales (Westbrook, 2001; Moseley *et al.*, 2004; Pistoia, 2008, 2010).

Periodo 1992-2002. Durante estos años se observa una mayor actividad inventiva relacionada con originación y recombinación. Respecto al periodo anterior, el número de patentes pasa de 200 a 438 (Cf. Cuadro III). Es un crecimiento que se asocia al diseño y desarrollo de vehículos eléctricos. En 1996, General Motors diseña el primer vehículo eléctrico (el EV-1) con baterías avanzada (VRLA) de plomo-ácido. Apoyada en sofisticados componentes electrónicos, es la primera experiencia de administrar de manera rigurosa la energía de la batería de plomo-ácido como batería de tracción (Mendoza y Argueta, 2000). Sin embargo, pese a los esfuerzos para mejorar el rendimiento de las baterías de plomo-ácido, se encuentra que su baja densidad de energía (cantidad de energía que es posible almacenar en un espacio) y su peso¹⁴ son los principales cuellos de botella que limitan su uso (Eurobat, 2016).

.....

¹³ Para este estudio la originación resulta ser particularmente relevante, pues mientras que en los trabajos de Strumsky *et al.* (2010, 2015) la originación representa apenas el 1% de todas las patentes analizadas, en este caso representa para todo el periodo el 40.1%. No es posible afirmar entonces que, para las baterías de plomo-ácido, la probabilidad de incorporar nuevas clases sea baja y por lo tanto “que el proceso de invención ha sido principalmente un proceso combinatorio acompañado de raras ocurrencias de originación tecnológica” (Strumsky *et al.*, 2015, p. 26)

¹⁴ Una batería de tracción convencional de PA pesa 270 kg y una VRLA incrementa su peso a 595 kg, ello por la incorporación de más componentes eléctrico/electrónicos y de su sistema de administración de energía (Garche *et al.*, 2015).



Período (2003-2013). En este último período los vehículos eléctricos, han sustituido un número cada vez mayor de sistemas mecánicos por sistemas eléctrico/electrónicos. Así mismo, se integran sofisticados sistemas de info-entretenimiento, confort, asistencia al conductor y sistemas de conducción autónoma. Todos estos sistemas para su funcionamiento requieren baterías con mayor energía específica y mayor potencia (Chanaron y Teske, 2007; Juliussen y Robinson, 2010, Eurobat, 2016). Durante este periodo, también se explora el uso de las baterías de plomo-ácido en los nichos emergentes de los microvehículos (que pesan menos de 1000 kilos) y en los micro-híbridos (Chumchal y Kurzweil, 2017). Aún, cuando los vehículos muestran cambios profundos, la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido no desaparece, mantiene un nivel de 264 patentes. Y, si bien disminuyen las patentes de originación –representan el 32% en este último periodo, cuando en el primer periodo contribuían con el 60 % de la actividad inventiva (Cf. Cuadro III)– su porcentaje no es despreciable e indica una intensa actividad inventiva original.

¿Cuánta de esta actividad inventiva se transforma en innovación, en nuevas tecnologías compitiendo en el mercado? ¿Cuántas patentes se quedan en el papel, inactivas y nunca se convierten en fuerza económica creativa-destructiva? ¿Cómo interactúan y co-evolucionan la actividad inventiva en los distintos nichos de mercado de las baterías de plomo-ácido? Estas preguntas son parte de un conjunto amplio y complejo de factores que rebasa el alcance de nuestra investigación.

Estos hechos estilizados son una guía inicial para enriquecer con detalles cómo ha evolucionado la complejidad y la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido de los vehículos eléctricos. Con todo, se considera que las preguntas y la taxonomía utilizada en este trabajo conduce a formular nuevas preguntas y problemas.

Conclusiones

Los estudios teóricos sobre el cambio tecnológico coinciden en que la combinación de capacidades tecnológicas nuevas y existentes es la principal fuente de novedad inventiva. Bajo esta visión combinatoria, dos perspectivas dominan la discusión: la evolución de la tecnología como variación de las formas exteriores de los artefactos (Basalla, 1988) y, la evolución de la tecnología como captura y recombinación de fenómenos naturales (Arthur, 2009). La perspectiva de Basalla estrecha el foco de atención a la dimensión exterior de los artefactos y no contribuye a identificar una gramática, las reglas de combinación que permiten que los fenómenos naturales se integren. Por su parte, el marco de Arthur permite plantear preguntas más significativas sobre cómo un componente maduro y simple, la batería de plomo-ácido se ha convertido en un sistema tecnológico complejo y en continua evolución.

Los estudios empíricos proporcionan aspectos generales de la invención, usando el número de patentes y el número de reivindicaciones como indicadores de la actividad, sin embargo, no hay un consenso metodológico para el análisis empírico del proceso de invención tecnológica. En resumen, hay controversias tanto en el ámbito teórico como en el empírico sobre el tratamiento de la invención tecnológica.

En el marco de los Sistemas Complejos Adaptables (Holland, 1992, 1995) y la perspectiva teórica desarrollada por Brian Arthur (2009), el presente trabajo permite avanzar en la comprensión



de la invención como un proceso de originación y recombinación de fenómenos y principios científicos. El uso de las clases como unidades de análisis empírico para medir y caracterizar la complejidad y tipo de la actividad inventiva es conveniente porque se trata de un sistema de clasificación detallado, refinado y actualizado por distintas generaciones de expertos evaluadores que identifican –sin los sesgos de las estrategias asociadas a los derechos de propiedad– la emergencia, crecimiento y diversificación de los campos tecnológicos. En contraste, los estudios de patentes tratados como casos o ejemplos resultan ser más descriptivos y teóricamente reduccionistas.

La metodología de Strumsky *et al.* (2010_{a,b}, 2011, 2015) utiliza las clases de las patentes para identificar el grado de complejidad tecnológica y cuatro tipos de novedad inventiva (origenación, nueva combinación, recombinación y reutilización) para las innovaciones registradas en la USPTO. Sin embargo, su enfoque teórico es propio del gradualismo. Sus hallazgos concluyen que las nuevas tecnologías surgen con mayor probabilidad de las tecnologías existentes y esto implica que las innovaciones emergen por la reutilización y recombinación de las capacidades y conocimientos generados previamente, en consecuencia, son propias de las actividades de explotación. No cuenta con una explicación de la emergencia de conocimiento absolutamente novedoso, ni de las razones que explican la emergencia e incremento de la complejidad. La metodología Strumsky *et al.* (2011, 2015) contribuye a medir sistemáticamente la complejidad tecnológica y a clasificar la novedad, pero al asumir una perspectiva teórica, para comprender la complejidad y el proceso de recombinación, se debe tener cuidado, pues esto puede conducir a interpretaciones confusas o incompletas.

Los resultados de este análisis permiten identificar, para el periodo de estudio (1981-2013), los siguientes hechos estilizados:

Cambios en la tendencia y la composición de la actividad inventiva (patentes) en las baterías avanzadas para los vehículos eléctricos (Cf. Figs. 1 y 2). Entre 1981-1991, las baterías de PA son el diseño dominante debido a sus características económicas, su avance tecnológico desarrollado por más de un siglo y el desconocimiento de los requerimientos técnicos de una batería de tracción. Durante 1992-2002, aunque la participación de las baterías de PA continúa siendo relevante (40% de las patentes), es desplazada por las baterías de Li-ion, NiHM y NiCd, (que representan el 29%, 25% y 6%, respectivamente). En contraste, su actividad inventiva crece aceleradamente, pasa de 18 patentes promedio anuales del primer período a 40 en este segundo. En el último período (2003-2013), las patentes de PA representan solo el 11% de las invenciones de baterías para los vehículos eléctricos y, además, se desacelera su actividad inventiva (de 438 a 264 patentes). Sin embargo, éstas prevalecen como baterías auxiliares aptas para suministrar y administrar energía a las aplicaciones eléctrica/electrónicas y digitales de los vehículos. Asimismo, como batería de tracción para vehículos eléctricos ligeros.

Incremento en la complejidad de las baterías de PA (Cf. Gráfica 3). Durante los 33 años que comprende el estudio, el promedio anual de clases pasa de 3 a 4 y, en el periodo 2003-2013, el 53% de las invenciones tienen 4 o más clases. Lo anterior sugiere un incremento, ligero y gradual, resultado del descubrimiento y convergencia de fenómenos (aplicaciones nanotecnológicas; hallazgos en nuevos materiales) y dominios tecnológicos (avances en la electroquímica o



el cómputo) representado por el incremento en el número de clases (bloques de construcción, N) y sus combinaciones (interdependencia, k) (Kauffman, 1993).

Cambios en la configuración de los tipos de novedad inventiva de las baterías de PA (Cf. Figs. 5 y 6). A pesar de que las baterías de PA son un tecnología madura, las patentes clasificadas como de originación se mantienen como las principales. En el primer período son 121 patentes (61%) de originación, en el segundo, 156 (36%) y en el último 85 (32%). Por su parte, las patentes de recombinación y reutilización contribuyen en el segundo período con 30% y 19% y en el tercero con 24% y 28%, respectivamente. Esto indica que, a pesar de que las baterías de PA son una tecnología madura, se mantiene una alta tasa invención original seguida de una creciente actividad de refinamiento.

¿Qué lecciones o pistas nos ayudan a aclarar los hechos estilizados? La industria automotriz ha usado las baterías de PA durante más de 150 años y a pesar de los cambios que ha sufrido, se continúa innovando en esta clase de baterías. Con tecnologías novedosas, más complejas y avanzadas que, como fuentes de energía confiable, de bajo costo y larga duración, se han adaptado: i) como batería auxiliar de los vehículos de energía alternativa; ii) como batería principal de los vehículos convencionales y microhíbridos y; iii) como batería de tracción de los microvehículos. La pregunta sobre la sustitución tecnológica de lo viejo por lo nuevo resulta en un escenario complejo de coexistencia, complementariedad y rivalidad de la tecnología de las baterías de plomo-acido con otras baterías más avanzadas. Esto es la conformación de diversas trayectorias tecnológicas que es necesario estudiar. Este trabajo contribuye sólo a identificar algunos de sus características prominentes.

Una limitación del presente trabajo es que la información de la actividad inventiva relacionada con las patentes comprende el periodo 1981-2013. No cabe duda que, para representar la tendencia más reciente de la actividad inventiva es necesario incluir el periodo 2014-2023. Sin embargo, los resultados que se extraen del periodo 1981-2013 son significativos toda vez que son tendencias estructurales que representan más de 30 años de actividad inventiva en la industria automotriz.



Anexo 1. Ejemplo de la taxonomía y metodología de Recombinación

A continuación se describe la lógica que subyace a la taxonomía de novedad inventiva. Suponga que se otorgan cuatro patentes, cada una de las cuales está integrada con cinco clases tecnológicas (denotadas con mayúsculas): A, B, C, D y E. Esta información permite construir combinaciones binarias, las cuales se presentan en el cuadro IV.

CUADRO IV: EJEMPLO DE LA TAXONOMÍA DE STRUMSKY, LOBO & VAN DER LEEUW (2011)

	Clases tecnológicas	Combinaciones binarias	Taxonomía de novedad inventiva
Patente 1:	A, E		Originación
Patente 2:	A, B, D		Nueva combinación
Patente 3:	D, E		Recombinación
Patente 4:	A, D, E		Reutilización

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE A STRUMSKY ET AL. (2011); STRUMSKY Y LOBO (2015).

En la patente 1, todas sus clases tecnológicas y combinaciones binarias son nuevas, por lo tanto, se la cataloga como una patente de "originación". La patente 2, aprovecha la clase A que ya fue utilizada en la patente 1 y dos clases nuevas (B y D). En la patente 2 se generan nuevas combinaciones binarias: AB, AD, y BD. Por esta razón se la clasifica, como una "nueva combinación". En la patente 3, sus dos clases (D y E) han sido utilizadas en patentes previas (E en la patente 1 y D en la 2). Sin embargo, la combinación resultante DE es nueva, se la considera entonces como una patente de "recombinación". Y finalmente, todas las combinaciones binarias de la patente 4 han sido utilizadas (AD en la patente 2, AE en la 1 y DE en la 3) por lo tanto, se clasifica como una patente de "reutilización". Cabe señalar que las combinaciones se tratan como tales y no como permutaciones, así, por ejemplo, la combinación binaria AE es igual que EA.



Referencias

- Arthur, W.B. (2015). *Complexity and the economy*. Oxford.
- Arthur, W.B. (2009). *The nature of technology: what it is and how it evolves*. The Free Press.
- Arthur, W.B. (2007). The structure of invention. *Research Policy*, 36(2), 274-287. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2006.11.005>
- Basalla, G. (1988). *The evolution of technology*. MIT Press.
- Bessen, J. y Meurer, M. J. (2008). *Patent failure: How judges, bureaucrats and lawyers put innovators at risk*. Princeton University Press.
- Broussely, M. (2007) "Traction batteries: EV and HEV" en M. Broussely y G. Pistoia, Eds (2007) *Industrial Applications of Batteries From Cars to Aerospace and Energy Storage*. Elsevier.
- Butler, S. (1863). *Darwing among the Machines*. Disponible en: <http://nzetc.victoria.ac.nz/tm/scholarly/tei-ButFir-t1-g1-t1-g1-t4-body.html>
- Chanaron, J-J. y Teske, J. (2007). Hybrid vehicles: a temporary step. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 7(4), pp.268-288. <https://doi.org/10.1504/ijatm.2007.017061>
- Chumchal, C. y Kurzweil, D. (2017). Lead-acid battery operation in micro-hybrid and electrified vehicles. En J. Garche, E. Karden, P.T. Moseley y D.A.J. Rand (Coord.), *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*. (pp. 395-414). ELSEVIER.
- Dosi, G.; K. Pavitt y L. Soete (1990) *The Economics of Technical Change and International trade*. New York University.
- EUROBAT (2016). *A review of battery technologies for automotive applications*. Disponible en: https://www.acea.be/uploads/publications/Rev_of_Battery_technology_-_full_report.pdf
- Fleming, L. y Sorenson, O. (2001). Technology as a complex adaptive system: evidence from patent data. *Research Policy*, 30(7), 1019-1039. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(00\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00135-9)
- Garche, J. y Moseley, P.T. (2017). Lead-acid batteries for E-bicycles and E-scooters. En J. Garche, E. Karden, P.T. Moseley y D.A.J. Rand (Coord.), *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*. (pp. 527-547). ELSEVIER.
- Garche, J., Moseley, P.T. y Karden, E. (2015). Lead-acid atteries for Hybrid electric vehicles and battery electric vehicles. En B. Scrosati, J. Garche y W. Tillmetz (Coord.), *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. (pp. 75-101). Woodhead Publishing.



- Gell-Mann, M. (1994). *The quark and the jaguar: Adventures in the simple and the complex*. Freeman.
- Gilfillan, S. C. (1935a). *Inventing the ship*. Follett Publishing.
- Gilfillan, S. C. (1935b). *The sociology of invention*. Follett Publishing.
- Griliches, Z. (1990). Patent Statistics as Economic Indicators: A survey. *Journal of Economic Literature*, 28(4), 1661-1707.
- Hall, B., Jaffe, A. y Trajtenberg, M. (2001). The NBER patent citations data file: Lessons, insights and methodological tools. *NBER Working Paper No. 8948*, National Bureau of Economic Research.
- Hall, B., Jaffe, A. y Trajtenberg, M. (2000). Market value and patent citations: A first look. *NBER Working Paper No. 7741*, National Bureau of Economic Research.
- Hockfield, Susan (2020) *The Age of Living Machines: How Biology Will Build the Next Technology Revolution*. W. W. Norton & Company.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University Michigan Press.
- Holland, J. H. (1995). *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Helix Books.
- Jaffe, A.B., Trajtenberg, M. y Hall, B. (2006). Market value and patent citations: a first look. En John Cantwell (editor), *The Economics of Patents*. Edward Elgar Publishers.
- Jaffe, A.B., Trajtenberg, M. y Henderson, R. (1993). Geographic localization of knowledge spillovers as evidenced by patent citations. *Quarterly Journal of Economics*, 108(3), 577- 598. <https://doi.org/10.2307/2118401>
- Jaffe, A.B. y Trajtenberg, M. (2002). *Patents, Citations, and Innovations: A Window on the Knowledge Economy*. MIT Press.
- Juliussen, E. y Robinson, R. (2010), *Is Europe in the Driver's Seat? The Competitiveness of the European Automotive Embedded Systems Industry*, Londres, Institute for Prospective Technological Studies, European Commission.
- Kaempffert, W. (1930). *Invention and society*. American Library Association.
- Kauffman, S. A. (1993). *The origins of order*. Oxford University Press.
- Kolmogorov, A. N. (1968). Three approaches to the quantitative definition of information. *International Journal of Computer Mathematics*, 2(1-4), 157-168. <https://doi.org/10.1080/00207166808803030>



- May, G.J., Calasanzio, D. y Aliberti, R. (2005) VRLA automotive batteries for stop-go and dual battery systems. *Journal of Power Sources*, 144(2), 411-417. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.11.008>
- Meissner, E. y Richther, G. (2005) The challenge to the automotive battery industry: the battery has to become an increasingly integrated component within the vehicle electric power system. *Journal of Power Sources*, 144(2), 438-460. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.10.031>
- Mendoza, A. y J. Argueta (2000) "GM EV1: Performance Characterization." Edison International Company. Electric Transportation Division. California. <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/2000panpbaev1report.pdf>
- Moseley, P.T., Rand, D.A.J. y Garche, J. (2017). Lead-acid batteries for future automobiles: status and prospects. En J. Garche, E. Karden, P.T. Moseley y D.A.J. Rand (Coord.), *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*. (pp. 601-618). ELSEVIER.
- Moseley, P.T., Garche, J., Parker, C.D. y Rand, D.A.J. (2004) *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*. ELSEVIER.
- Moser, P. y Nicholas, T. (2004). Was electricity a general purpose technology? Evidence from historical patent citations. *American Economic Review*, 94(2), 388-394. <https://doi.org/10.1257/0002828041301407>
- National Research Council (2013), *Transitions to Alternative Vehicles and Fuels*. The National Academies Press.
- Page, S.E. (2014). Where diversity comes from and why it matters? *European Journal of Social Psychology*, 44(4), 267-279. <https://doi.org/10.1002/ejsp.2016>
- Page, S.E. (2011). *Diversity and complexity*. Princeton University Press.
- Pavlov, D. (2011) *Lead-Acid Batteries: Science and Technology: A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and its Influence on the Product*. Springer.
- Pistoia, G. (2010) *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Elsevier.
- Pistoia, G. (2008). *Battery operated devices and systems: From portable electronics to industrial products*. Elsevier.
- Schallenberg, R. (1982) *Bottled Energy: Electrical Engineering and the Evolution of Chemical Energy Storage*. United States.



- Strumsky, D. y Lobo, J. (2015). Identifying the sources of technological novelty in the process of invention. *Research Policy*, 44, 1445-1461. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.05.008>
- Strumsky, D., Lobo, J. y van der Leeuw, S. (2011) Measuring the relative importance of reusing recombining, and creating technologies in the process of invention. SFI Working Paper No. 11-02-003, Santa Fe Institute.
- Strumsky, D., Lobo, J. y van der Leeuw, S. (2010b). Using patent technology codes to study technological change. *Economics of Innovation and New Technology*, 21(3), 267-286. <https://doi.org/10.1080/10438599.2011.578709>
- Strumsky, D., Lobo, J. y Tainter, J. (2010a). Complexity and the productivity of innovation. *Systems Research and Behavioral Science*, 27(5), 496-509. <https://doi.org/10.1002/sres.1057>
- Tainter, J.A. (1988) *The collapse of complex societies*. Cambridge University Press.
- Watson; P. (2016) *Convergence: The Idea at the Heart of Science*. Simon & Schuster.
- Westbrook, M. (2001). *The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*. The Institution of Engineering and Technology.
- Young, H., Strumsky, D., Bettencourt, L.M.A. y Lobo, J. (2015). Invention as a combinatorial process: Patents from U.S. Patents. *Journal Royal Society Interface*, 12 (20150272). <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0272>
- Youtie, J., Iacopetta, M. y Graham, S. (2008). Assessing the nature of nanotechnology: can we uncover an emerging general purpose technology? *The Journal of Technology Transfer*, 33, 315-329. <https://doi.org/10.1007/s10961-007-9030-6>





Como citar:

Lara, A., Jaimes, G. y Chávez, R. Las fuentes de novedad inventiva en las baterías de plomo-ácido de los vehículos eléctricos. *Administración y organizaciones* 26(50).



Administración y Organizaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco se encuentra bajo una licencia Creative Commons. Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional License.