

Recombinación y complejidad tecnológica en las baterías de plomo-ácido diseñadas para los vehículos de energía alternativa

Recombination and technological complexity in lead-acid batteries designed for alternative energy vehicles

Guadalupe Jaimes¹

Artemio Chávez²

Arturo Lara³

Resumen

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, Moseley y Karden, 2015; Moseley, Rand y Garche, 2017). Sin embargo, con el ingreso disruptivo al mercado de los vehículos eléctricos e híbridos, así como de las nuevas baterías de iones de litio y baterías de níquel-hidruros metálicos, la tecnología de las baterías de plomo-ácido está sufriendo transformaciones profundas que es necesario estudiar.

El objetivo principal de este trabajo es reconstruir de manera cuantitativa y cualitativa la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido utilizadas en vehículos de energías alternativas. A partir de la información de la base de datos de la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos, y la metodología desarrollada por Strumsky, Lobo y van der Leeuw (2011), es posible representar diferentes grados de novedad inventiva, así como medir la creciente complejidad

¹ Afiliación institucional: Profesora curricular de medio tiempo de la UAM – Iztapalapa Nacionalidad: mexicana. <jaimes.guadalupe.084@gmail.com>.

² Afiliación institucional: Profesor-Investigador de tiempo completo de la UAM – Xochimilco. Nacionalidad: <mexicana artemio79@hotmail.com>.

³ Afiliación institucional: Profesor-Investigador de tiempo completo de la UAM – Xochimilco. Miembro del SIN, nivel III. Nacionalidad: mexicana Correo: <alararivero35@gmail.com>.

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: Recombinación, complejidad, clases tecnológicas, baterías de plomo-ácido, vehículos de energía alternativa.

Clasificación JEL: O; O3; o31; o33.

Recombination and technological complexity in lead-acid batteries designed for alternative energy vehicles

During the 20th century, the lead-acid battery became the dominant design in the automotive industry due to its low cost, safety, and level of performance (Pistoia, 2008; Garche, Moseley and Karden, 2015; Moseley, Rand and Garche, 2017). However, with the disruptive entry into the market of electric and hybrid vehicles, as well as the new lithium-ion batteries and nickel-metal hydride batteries, lead-acid battery technology is undergoing profound transformations that are necessary study. The main objective of this paper is to reconstruct the inventive activity of lead-acid batteries used in alternative energy vehicles. Based on the information from the United States Patent and Trademark Office database and based on the methodology developed by Strumsky, Lobo and van der Leeuw (2011), 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: Recombination, complexity, technological classes, lead-acid batteries, alternative energy vehicles.

Clasificación JEL: O; O3; o31; o33.

Introducción

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, Moseley y Karden, 2015; Moseley, Rand y Garche, 2017). Sin embargo, ante la emergencia de los vehículos de energía alternativa (VEA), las baterías de plomo-ácido 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; Moseley, Rand y Garche, 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).

¿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. No obstante, la principal controversia teórica se delimita a dos enfoques:⁴

1. 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 el del historiador de la técnica George Basalla (1988), en el que establece el «artefacto» como unidad de análisis primario y al «exterior» de la tecnología, equivalente al fenotipo en la biología, como el centro del objeto de estudio. Este planteamiento 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, 1935a, b; Basalla, 1988). De acuerdo con este enfoque, es posible establecer una especie de herencia en relación con las características físicas de las tecnologías, que se interpreta como la tendencia de las nuevas tecnologías a parecerse a las tecnologías anteriores, y que permite trazar una línea del descenso

⁴ Véase Lara, Chávez y Jaimes (2020) para una descripción más detallada de los enfoques predominantes.

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 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, Jaffe y Trajtenberg, 2000, 2001; Youtie, Iacopetta y Graham, 2008).

2. La evolución de la tecnología como captura y recombinación de fenómenos naturales

Por su parte, un segundo enfoque, propuesto por Brian Arthur (2009), plantea que la naturaleza profunda de la evolución tecnológica radica en la recombinación de fenómenos naturales (Arthur, 2009). Argumento cuya comprensión y desarrollo no se puede alinear a una narración darwiniana. Para esta perspectiva, los fenómenos son la unidad de información y la gramática que vinculan el presente con el pasado:

El paralelo no es exacto, por supuesto; pero, así como los organismos se crean a sí mismos en muchas formas y especies diferentes mediante el uso del mismo conjunto de genes «programados» para activarse en diferentes secuencias, sin que un gen corresponda a una estructura particular; la tecnología crea novedad al recombinar y programar un conjunto de fenómenos de maneras diferentes» (Arthur, 2009, p. 39).

Sin embargo, 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 e interconexiones

termina afectando 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.

Desde esta perspectiva, 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 en la medida en que se agregan funciones y modificaciones a sus estructuras. Y en la medida en que su arquitectura de trabajo combina una mayor diversidad de componentes, que orquestan distintos fenómenos, la tecnología se adapta a circunstancias excepcionales o un mundo más complejo (Arthur, 2007). La complejidad de los sistemas tecnológicos depende sí del número de componentes, pero en mayor medida de las interacciones resultantes.

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, el trabajo busca representar la evolución de baterías de plomo-ácido utilizadas por los VEA. Este estudio combina la historia de la trayectoria tecnológica de las baterías con indicadores cuantitativos y 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, Lobo y van der Leeuw (2011). De este modo, se describe de manera cuantitativa la actividad inventiva y la complejidad tecnológica relacionada con 902 patentes para el periodo 1981-2013. Este trabajo contribuye al estudio de la evolución tecnológica estableciendo un puente entre la teoría de la invención de Brian Arthur (2009) y la metodología para identificar los diferentes tipos de novedad inventiva (Strumsky, Lobo y van der Leeuw, 2011), a partir del estudio de una tecnología particular: las baterías de plomo-ácido de los VEA.

Las preguntas que guían este trabajo son: 1) dentro de la actividad inventiva de las baterías diseñadas para los vehículos de energía alternativa, ¿cuál es la participación de las baterías de plomo-ácido?; 2) ¿qué factores permiten dar cuenta de su creciente complejidad tecnológica?; 3) ¿cómo medir esa mayor complejidad?; 4) ¿cuáles son los principales tipos de novedad que caracterizan la evolución tecnológica de la batería de plomo-ácido?, y 5) ¿las nuevas baterías están sustituyendo 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 el uso de las clases de las patentes para cuantifi-

car la complejidad tecnológica e identificar, a partir de la taxonomía de Strumsky, Lobo y van der Leeuw (2011), los diversos tipos de novedad inventiva. En la segunda sección, con base en las patentes de la USPTO, se compara la actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido (PA) respecto a las baterías de iones de litio (LI), de níquel-cadmio (NiCd) y de níquel-hidruros metálicos (NiHM) utilizadas por los VEA. 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.

3. Clases tecnológicas, complejidad y tipos de novedad

Las patentes permiten medir la actividad inventiva en general (Griliches, 1990; Jaffe, Trajtenberg y Henderson, 1993; Jaffe y Trajtenberg, 2002; Jaffe, Trajtenberg y Hall, 2006), pero para identificar los tipos de novedad inventiva y su complejidad se necesita una unidad más fina: 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 los Estados Unidos (USPC) que, por mandato legal, proporciona una referencia exhaustiva de todos los temas patentables y está sujeto a revisión periódica.⁵ Es conveniente el uso de las clases como unidades de análisis empírico para medir y caracterizar la complejidad y tipo de la actividad inventiva 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.⁶ Las clases indican características específicas

⁵ Cabe señalar que este sistema estuvo vigente hasta el año 2015, cuando la 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.

⁶ 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

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 empírica, el grado de novedad de una tecnología⁷ (Strumsky, Lobo y van der Leeuw, 2010).

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, Lobo y van der Leeuw (2011) 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:

1. **Originación:** todas las clases de la patente son nuevas y, por 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.

«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».

⁷ En el marco de los Sistemas Complejos Adaptables (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 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, Jaffe y Trajtenberg (2001), Moser y Nicholas (2004).

4. Reutilización: todas las clases de la patente y sus combinaciones binarias han sido previamente utilizadas en otras patentes.

Con base en la información de las patentes y sus clases tecnológicas (principalmente), se representa la actividad inventiva de las baterías PA, su complejidad y los tipos de novedad que se observan entre 1981 y 2013.

4. Actividad inventiva en las baterías avanzadas para VEA

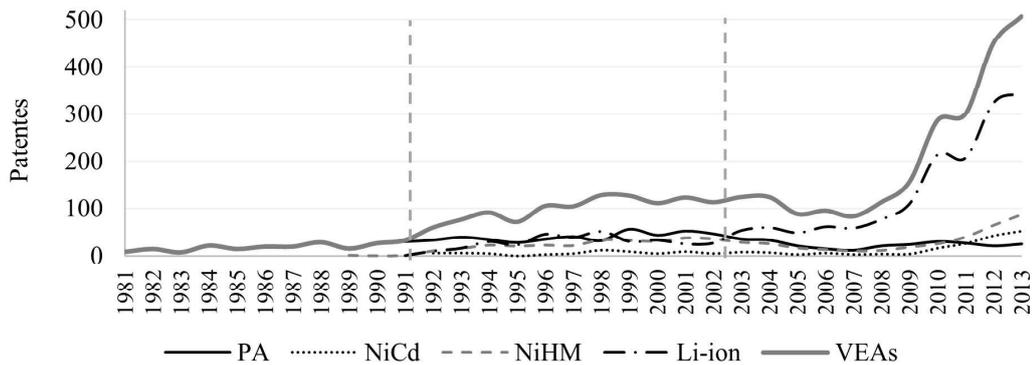
Las empresas del sector automotriz han explorado diversos materiales –níquel-cadmio (NiCd), níquel-hidruros-metálicos (NiMH) y iones de litio (Li-ion)– como alternativa a las baterías de plomo-ácido (PA). Una forma de captar los esfuerzos inventivos y la transición a nuevos y más sofisticados sistemas de almacenamiento de energía demandados por los VEA es observar la evolución en el número de patentes para cada tipo batería.⁸

En la figura 1 se observa un incremento general de la actividad inventiva en las baterías para VEA. 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

⁸ 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 9413 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 VEA, 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 construirla, y b) se descartaría la posibilidad de observar relaciones entre este tipo de productos y los de la industria automotriz.

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.

FIGURA 1. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PATENTES PARA BATERÍAS AVANZADAS DE LOS VEA, POR TIPO DE MATERIAL ACTIVO



Fuente: Base de datos de la USPTO. Elaboración propia

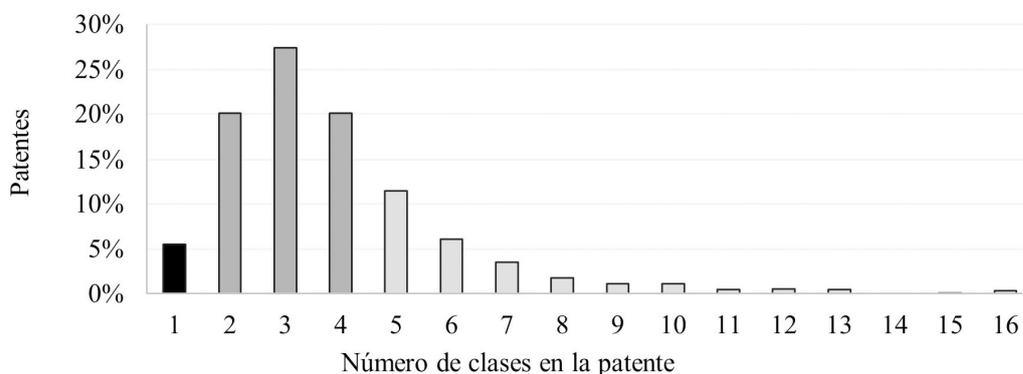
Así, en el primer periodo el diseño dominante es la batería de PA. Durante el segundo periodo (1992-2002), la participación de las baterías de PA se reduce, entre otras razones, por sus limitaciones de energía y potencia. Es por ello por lo que en este periodo emergen nuevos materiales que intentan satisfacer los requerimientos de los VEA. 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.

Distintos trabajos (Westbrook, 2001; Moseley, Garche, Parker y Rand, 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? Ésta ¿se relaciona con un incremento en su complejidad? La siguiente sección trata sobre esto.

5. Evolución de la complejidad tecnológica de las baterías de plomo-acido

Una primera forma de identificar la complejidad de las patentes es observando los porcentajes de patentes de acuerdo con su número de clases (figura 2). De las 902 patentes que integran el total, 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) cuenta con una única clase tecnológica, mientras que el 64.7% tiene entre dos y cuatro clases.

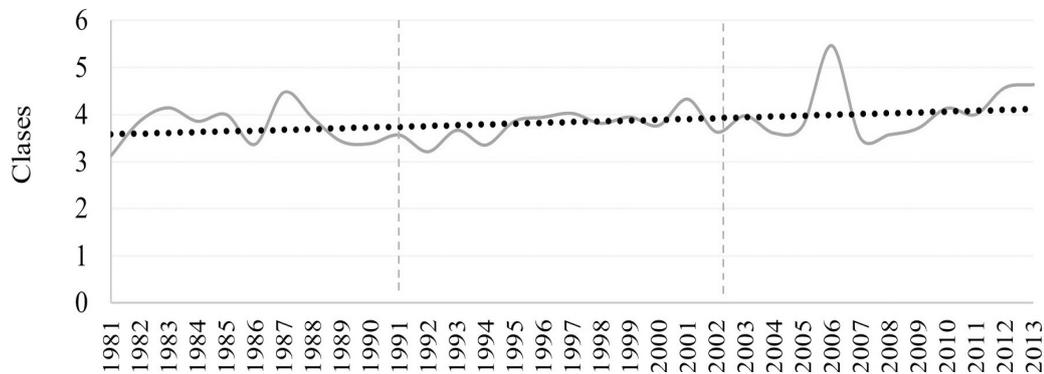
FIGURA 2. PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PA PARA VEA, POR SU NÚMERO DE CLASES (1981-2013)



Fuente: Base de datos de la USPTO. Elaboración propia

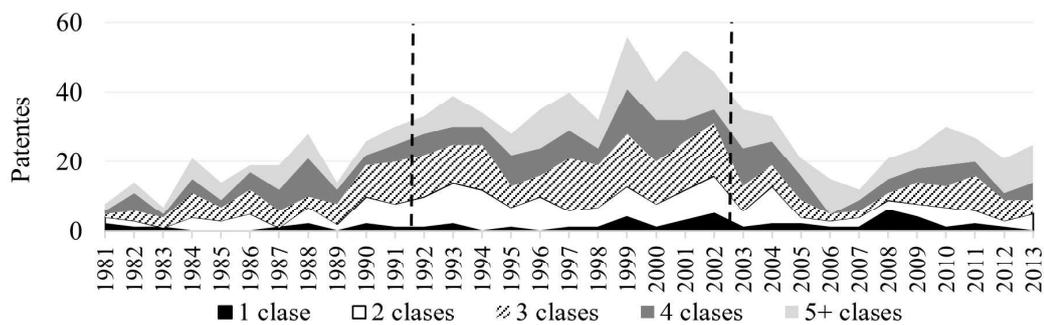
Conviene ahora observar la evolución del número de clases por periodo. El promedio anual de las clases tiene una tendencia ligeramente creciente (cf. figura 3). Durante todo el periodo (1981-2013), el promedio es de 3.86 clases. Sin embargo, el promedio esconde diferencias significativas. La proporción de patentes según el número de clases cambia durante el periodo de análisis (cf. figura 4 y cuadro 1). 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).

FIGURA 3. PROMEDIO ANUAL DE LAS CLASES DE LAS PATENTES DE PA PARA VEA



Fuente: Base de datos de la USPTO. Elaboración propia

FIGURA 4. NÚMERO DE PATENTES DE BATERÍAS DE PA PARA VEA, POR NÚMERO DE CLASES



Fuente: Base de datos de la USPTO. Elaboración propia

CUADRO 1. CANTIDAD Y PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PA PARA VEA, POR 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 de la USPTO. Elaboración propia

Los datos revelan que conforme avanza la actividad inventiva, las patentes combinan cada vez un número mayor de clases, mayormente de 4 o más clases en último periodo. 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 periodo representan el 46% y 43.7%, respectivamente.

¿Por qué las baterías de PA para VEA 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-acido (Gou, Xu y Feng, 2020); b) la convergencia e interacción de dominios tecnológicos antes separados (mecatrónica, electroquímica y nanotecnología) (Hockfield, 2020; Watson, 2016); c) diseños más complejos de los componentes, sensores electrónicos y microcomputadoras para administrar la energía de la batería (Garche, Moseley y Karden, 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; Chávez y Lara, 2016).

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 avanzada⁹ 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 PA (Chumchal y Kurzweil, 2017). La segunda dirección que explica el aumento en la complejidad de las baterías de PA es su uso como baterías de tracción para los microvehículos monoplaza y biplaza menores de 1000 kilos (Garche y Moseley, 2017).¹⁰ 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; Chávez y Lara, 2020).

⁹ Las principales baterías avanzadas son: Valve Regulated Lead Acid (VRLA); Enhanced Flooded Batteries (EFB) o las Gel Battery (GB) y las Absorption Glass Mat (AGM), estas dos últimas derivaciones de la batería VRLA (May, Calasanzio y Aliberti, 2005).

¹⁰ 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 compensan con su bajo costo (National Research Council, 2013).

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?

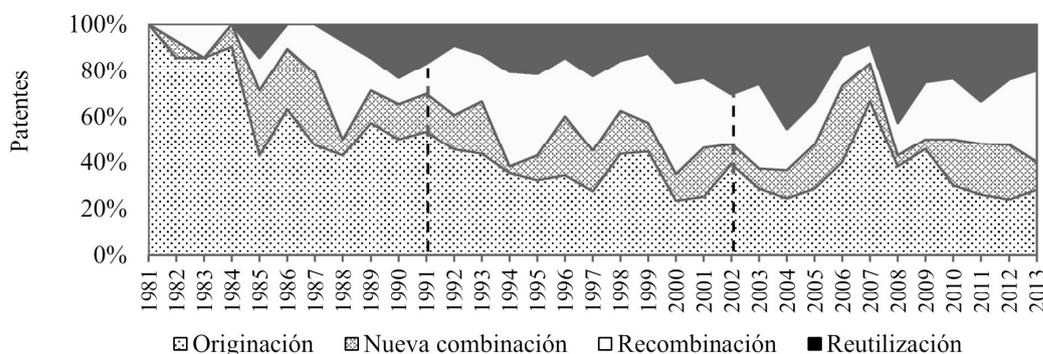
6. Tipos de novedad inventiva en las baterías de PA para los VEA

Examinada la creciente complejidad de las baterías de PA, es pertinente determinar si ésta es resultado de un proceso de recombinación de conocimientos y capacidades existentes o si se trata de un desarrollo original y novedoso.

Con base en la taxonomía Strumsky, Lobo y van der Leeuw (2011), se describe la evolución de los tipos de novedad inventiva de las baterías de plomo-ácido (cf. figura 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 2), pese al esperado desplazamiento de la batería de plomo-ácido por otro tipo de baterías.

Por su parte, las patentes de recombinación 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.

FIGURA 5. PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PA POR TIPO DE NOVEDAD INVENTIVA



Fuente: Base de datos de la USPTO. Elaboración propia

CUADRO 2: NÚMERO Y PORCENTAJE DE PATENTES DE BATERÍAS DE PA PARA VEA, POR TIPO DE NOVEDAD

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

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.¹¹ Una vez que se ha examinado cómo en las últimas tres décadas ha

¹¹ Para este estudio, la originación resulta ser particularmente relevante, pues mientras que en los trabajos de Strumsky, Lobo y Tainter (2010), Strumsky y Lobo (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 PA la probabilidad de incorporar nuevas clases sea baja y por tanto «que el proceso de invención ha sido principalmente un proceso combinatorio acompañado de raras ocurrencias de originación tecnológica» (Strumsky y Lobo, 2015, p. 26).

evolucionado la actividad inventiva relacionada con las baterías de PA, es necesario describir los principales hechos estilizados de cada periodo.

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. Por esta razón, durante estos años se observa escasa actividad inventiva asociada a las baterías de plomo-ácido (cf. cuadro 2) y una relativamente moderada complejidad medida por el promedio de clases (cf. cuadro 1). La actividad inventiva de las baterías de plomo-ácido durante este periodo 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, Garche, Parker y Rand, 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 2). Es un crecimiento que se asocia al diseño y desarrollo de vehículos eléctricos. En 1996, General Motors diseña el primer vehículo eléctrico con baterías avanzada (VRLA) de plomo-ácido, su vehículo EV-1. 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 peso¹² son los principales cuellos de botella que limitan su uso (EUROBAT, 2016).

Periodo (2003-2013). En este último periodo, los vehículos eléctricos han sustituido un número cada vez mayor de sistemas mecánicos por sistemas eléctrico/electrónicos. Asimismo, 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

¹² 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, Moseley y Karden, 2015).

potencia (Chanaron y Teske, 2007; Juliussen y Robinson, 2010). 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 microhíbridos (Chumchal y Kurzweil, 2017). Aún, cuando los vehículos muestran cambios profundos, la actividad inventiva de las baterías de PA 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 2)– su porcentaje no es despreciable e indica una intensa actividad inventiva original.

Estos hechos estilizados son una guía inicial para enriquecer con detalles la evolución de la complejidad multinivel de las tecnologías asociadas a las baterías de PA de los VEA. 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, tres perspectivas dominan la discusión: el gradualismo, la combinación/acumulación y la recombinación de los fenómenos naturales. Por su parte, los estudios empíricos proporcionan aspectos generales de la innovación usando el número de patentes y el número de reivindicaciones como indicadores de la actividad inventiva; sin embargo, no hay un consenso metodológico para el análisis empírico del proceso de recombinación tecnológica. En resumen, hay controversias tanto en el ámbito teórico como en el empírico sobre el tratamiento de la recombinación 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 refinado y actualizado por distintas generaciones de expertos evaluadores que identifican –sin los sesgos de las estrategias asociadas a los derechos de pro-

iedad— 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 propuesta por Strumsky, Lobo y van der Leeuw (2011), utiliza las clases de las patentes para identificar el grado de complejidad tecnológica y cuatro tipos de novedad inventiva (originación, 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 la 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, Lobo y van der Leeuw (2011), 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 VEA (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 un 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 periodo a 40 en este segundo. En el último periodo (2003-2013), las patentes de PA representan sólo el 11% de las invenciones de baterías para VEA 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 dispositivo energético central para vehículos eléctricos ligeros.

Incremento en la complejidad de las baterías de PA (cf. figura 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).

Cambios en la configuración de los tipos de novedad inventiva de las baterías para PA (cf. Figs. 5 y 6). A pesar de que las baterías de PA son una tecnología madura, las patentes clasificadas como de originación se mantienen como las principales. En el primer periodo 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 periodo 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 de invención original seguida de una creciente actividad de refinamiento.

Desde la perspectiva de las actividades de exploración y explotación, se puede afirmar que la búsqueda de soluciones ha tendido de la exploración hacia un balance relativo entre las actividades de exploración y explotación. En concreto, las patentes de originación y nuevas combinaciones, asociadas con la exploración, pasan del 76% en el primer periodo a 51% y 47% en los periodos subsecuentes y las patentes de recombinación y reutilización, asociadas con la explotación, representan para cada periodo el 24%, 49% y 53%, respectivamente.

¿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 del drástico cambio que ha sufrido, se continúa innovando en este tipo 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-ácido con otras baterías más avanzadas. Esto es la conformación de diversas trayectorias tecnológicas que es necesario estudiar, y que este trabajo contribuye sólo a identificar algunos de sus características prominentes.

Referencias

- 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.
- Brey, P. (2008). Technological Design as an Evolutionary Process. En P. E. Vermaas et al. (ed.). *Philosophy and Design*. Springer, 61-75.
- Broussely, M. (2007). Traction batteries: EV and HEV. En M. Broussely y G. Pistoia (ed.). *Industrial Applications of Batteries From Cars to Aerospace and Energy Storage*. Elsevier, 203-271.
- Butler, S. (1863). *Darwing Among the Machines*. <<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), 268-288. <<https://doi.org/10.1504/ijatm.2007.017061>>.
- Chávez, A. y Lara, A. (2016). Evolution of the Complex Nature of Electrical Vehicles. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 16(4), 389-411. <<https://doi.org/10.1504/IJATM.2016.081620>>.
- Chávez, A. y Lara, A. (2020). The Diversity of Agents and Patent Thicket Evolution in Electric Vehicles. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 20(1), 76-107. <<https://doi.org/10.1504/IJATM.2020.105309>>.
- 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*. Elsevier, 295-414.

- EUROBAT (2016). A Review of Battery Technologies for Automotive Applications. <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*. Elsevier, 527-547.
- Garche, J., Moseley, P. T. y Karden, E. (2015). Lead-acid Batteries for Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicles. En B. Scrosati, J. Garche y W. Tillmetz (coord.). *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Woodhead Publishing, 75-101.
- 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. <<https://www.jstor.org/stable/2727442>>.
- Gou, B., Xu, Y. y Feng, X. (2020). An Ensemble Learning-Based Data-Driven Method for Online State-Of-Health Estimation of Batteries. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2), 422-436.
- Hall, B., Jaffe, A. y Trajtenberg, M. (2001). The NBER patent Citations Data File: Lessons, Insights and Methodological Tools. *NBER Working Paper*, 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*, 7741. National Bureau of Economic Research.
- Hockfield, S. (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 (ed.). *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. <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC61541>>.
- 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>>.
- Lara, A., Chávez, A. y Jaimes, G. (2020). Recombination and Complexity: The Case of Automobile. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 20(3), 258-274. <<https://doi.org/10.1504/IJATM.2020.110403>>.
- May, G. J., Calasanzio, D. y Aliberti, R. (2005). VRLA Automotive Batteries for Stoppygo 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 Argueta, J. (2000). GM EV1: *Performance Characterization*. Edison International Company. Electric Transportation Division. California. <<https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/2000panpbav1report.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*. Elsevier, 601-618.
- 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*, 11-02-003. Santa Fe Institute.
- Strumsky, D., Lobo, J. y van der Leeuw, S. (2010). 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. (2010). Complexity and the Productivity of Innovation. *Systems Research and Behavioral Science*, 27(5), 496-509. <<https://doi.org/10.1002/sres.1057>>.
- 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.
- 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>>.