

# Diversidad en el sector tecnológico de baterías. Una propuesta metodológica basada en la medición de entropía con patentes

*Technological diversity in the battery technology sector.*

*A methodology based on entropy measurement and use of patents*

**Juan Reyes Álvarez \***

## Resumen

El trabajo propone una metodología para la medición de la diversidad tecnológica, se considera la entropía como un indicador usando a las patentes y además se conceptualiza la evolución de la diversidad desde una propuesta de los sistemas complejos. Se toma como ejemplo el sector tecnológico de las baterías dada su relevancia actual en la economía.

## Resumen

This paper proposes a methodology to measure technological diversity. It is through Entropy (information theory Shannon) and patents as the indicator is constructed. The interpretation is based on the theory of complex systems and concepts of exploration and exploitation. The battery technology sector is the case study for its current importance in the economy.

\* Profesor colaborador Benemérita  
Universidad Autónoma de Puebla, sus áreas de  
trabajo son: la econometría, economía monetaria y  
financiera, así como política fiscal.

## Palabras clave

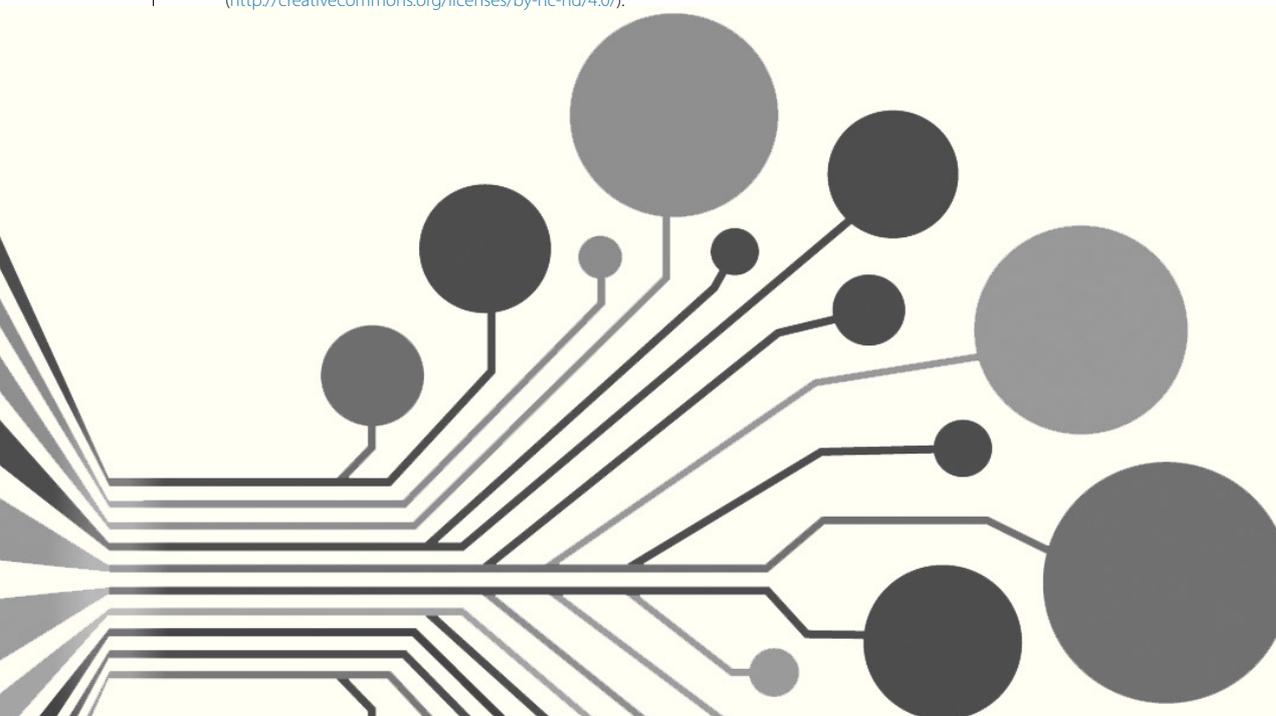
*Diversidad, Exploración, Explotación,  
Patentes*

## Key words

*Diversity, Exploration, Exploitation,  
Patents*

JEL

© 2016 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Economía. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



## Introducción

La evolución de un sector tecnológico puede ser explicada mediante un fenómeno de exploración y explotación, esto significa que existen dos tipos de búsqueda: una más allá de lo local de algún sector tecnológico (exploración lo desconocido) y otra donde se aprovecha lo adyacente posible (explota lo conocido). Este fenómeno se expresa en la emergencia de nuevos diseños tecnológicos: en el crecimiento de diversidad tecnológica.

Una tecnología que puede servir de ejemplo para describir este fenómeno son las baterías. En principio las baterías se han vuelto omnipresentes, casi toda la población mundial adulta tiene al alcance un teléfono celular y esto implica una batería, si a esto se añade, toda la diversidad posible de celulares, y otros artefactos que hacen uso de una batería podemos deducir que la diversidad de ellas es casi imposible de cuantificar.

En ese tenor, el trabajo tiene como primer objetivo describir la evolución del sector tecnológico de baterías haciendo hincapié en el fenómeno de exploración y explotación que se da a lo largo de la vida de dichas baterías, por otro lado, como un segundo objetivo se propone una metodología explícita para la obtención de indicadores de diversidad mediante el uso de patentes que complementa el análisis de los conceptos de exploración y explotación, y como objetivo último se hace explícita una propuesta de análisis desde la perspectiva de las complejidad.

En ese tenor el artículo se divide en 6 apartados: en el primero se hace mención de cómo los conceptos de exploración y explotación son retomados en la economía de la innovación; en segundo se identifica cómo a partir de la perspectiva de la complejidad podemos descomponer y construir el sector tecnológico de

las baterías; en el tercer apartado se describe la metodología para la medición de la diversidad tecnológica; en el siguiente se hace descripción del proceso; por último se dan las conclusiones.

## 1. Exploración y Explotación

Exploración y explotación son un par de conceptos que desde la gestión tecnológica (Tushman y Anderson, 1986; Anderson Tushman y 1990) y parte de la economía de la innovación (Levinthal y March, 1993) han sido retomados para la interpretación de la evolución de los sistemas tecnológicos y de artefactos principalmente, y también desde una visión de los sistemas complejos (Frenken, 2006; Page, 2011) y que son ahora parte de la economía institucional y evolutiva. En principio dichas coincidencias surgen a partir de analizar cómo las empresas responden a los estímulos del mercado dadas sus capacidades en la búsqueda de al menos dos fenómenos: 1) Explotar los productos de los que tienen experiencia y de los que el mercado demanda; 2) Explorar nuevos posibles productos que generen posibles ganancias.

La explotación se sustenta principalmente en economías de escala, y la empresa tiende a la especialización de algunos productos, asimismo, esto exige rutinas dentro de la empresa (Nelson y Winter, 1982). A la larga la empresa se vuelve miope –por la especialización–, no ve más allá de su vecindad, ni la generación de nuevos productos (Levinthal y March, 1993:101). Por otro lado, la empresa también enfrenta **cambios** en las necesidades de sus consumidores y **competencia** de otras empresas, por lo que esa especialización podría llevar a sus productos a ser desplazados. Por otro lado, totalmente nuevos productos o desarrollos tecnológicos siempre son riesgosos (aun con estudios de previsión y planeación no



se sabe si el mercado los aceptará), sin embargo, la exploración de nuevos productos le permite acceder a posibles nichos de mercado. La empresa se enfrenta a una decisión, explorar en zonas no adyacentes o explotar lo local. En ese tenor la decisión de permanecer en nichos de mercado seguros o moverse para explorar nuevos tiene un *trade-off*: la explotación de un producto puede estar segura en el presente, pero depreciarse en el tiempo por la presión de la competencia, por otro lado, la exploración de nuevos productos es incierta al no saber cómo responderá el mercado. Al respecto, la empresa podría resolver dicho *trade-off* por medio de dos alternativas: una estrategia de equilibrio puntuado y de empresa ambidiestra.

March (1991) y Levinthal (1998) describen que una empresa busca en principio la novedad para hacerse de uno o varios nichos y luego explotar los que resulten más beneficiosos. El

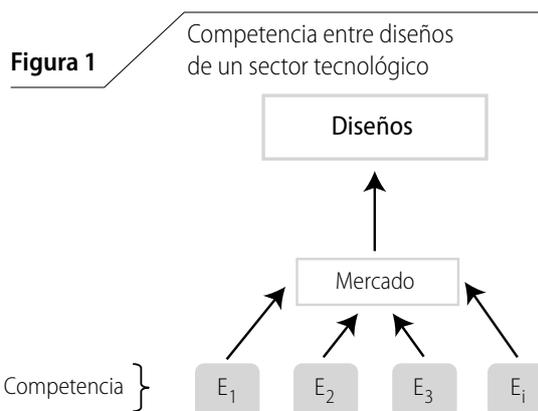
proceso iniciaría de exploración de diseños (en productos, rutinas y organizaciones) al cual le continúa uno de explotación o de **selección** de aquellos productos y procesos que le resulten más beneficiosos, en éste sentido el proceso de exploración (dados los recursos invertidos en la búsqueda) tendría que ser mucho más corto que el de explotación. Esto mostraría un proceso primero de diversidad de diseños para después un declive de ésta permaneciendo constante (la diversidad) por un largo periodo. Este proceso se le denominó equilibrio puntuado por Anderson y Tushman (1990) al hacer analogía a la teoría de los paleontólogos Eldredge y Gould (1972).

Por otro lado He y Wong (2004), plantearon que la empresa afronta el *trade-off* mediante un equilibrio entre la búsqueda de nuevos nichos (por ejemplo lanzando nuevos productos) y explotando los existentes en un mercado

maduro o en el que tiene experiencia. Esta forma de búsqueda equilibra el *trade-off* en la empresa, siendo una combinación de exploración y explotación, a las empresas que desarrollan la capacidad se les suele denominar **empresa ambidiestra**.

Hasta aquí se puede observar un análisis a nivel de firma, sin embargo, Anderson y Tushman (1990), March (1991) y Levinthal (1993), utilizan el concepto de exploración y explotación también para describir la evolución de sectores tecnológicos, la explicación que apuntan es: 1) Surge un proceso de exploración de varias tecnologías en un mismo sector, seguido de la explotación de las tecnologías más aptas en el mercado. Este proceso de exploración y explotación puede ser expresado en cambios en la diversidad de tecnologías, donde los incrementos de diversidad son traducidos en exploración de tecnologías y un decremento en explotación de aquellos con niveles de adaptación o aptitud más altos.

La forma en que interactúan dichas búsquedas, puede dar resultado a un proceso donde emerjan diseños muy diferenciados. Por ejemplo, el conjunto “E” de empresas está representado en el Esquema 1, cada empresa propone una estrategia ante la competencia, dada la interacción de estrategias, surgirá una diversidad de propuestas. Después de la búsqueda de cada empresa se presentan muchas variedades tecnológicas de un mismo sector, tras la competencia podrían emerger algunas tecnologías dominantes en el mercado. La tecnología en ese sentido se puede definir como un diseño. Al respecto, Abernathy y Utterback (1978) definen como un diseño dominante, aquel diseño que se encuentra estandarizado en una industria.



Entre la búsqueda de nuevos diseños emergen paisajes de aptitud,<sup>1</sup> este paisaje puede concebirse también como una mezcla de innovaciones con diferente nivel de importancia en un sector o mercado (como se muestra en la figura 2). Por ejemplo, aquellas innovaciones o nuevos diseños que hacen cambios graduales en las características de algunos diseños del sector se pueden considerar como incrementales. Por otro lado, aquellos diseños que generan un nuevo producto que crea nuevas aplicaciones hasta el caso de crear una nueva industria se le denomina innovaciones radicales. Las innovaciones incrementales podrían considerarse innovaciones de explotación y las radicales innovaciones de exploración.

La emergencia de diferentes y nuevos nichos de mercado con diferentes niveles de aptitud, no resulta contradictoria con la presencia de diseños dominantes. Un diseño dominante no tiene que abarcar la totalidad de la industria, si no representar niveles de aptitud más altos que el resto y que tengan impacto en el sector tecnológico, como las innovaciones radicales. En realidad, lo que surge es la

1 Un paisaje de aptitud es una representación realizada por Kauffman (1993, 1995 y 2003) que muestra como en un mismo mercado pueden coexistir óptimos globales y óptimos locales, lo que tiene importantes implicaciones en el análisis microeconómico.

coexistencia de innovaciones radicales e incrementales, formando un paisaje de aptitud con óptimos locales y globales.<sup>2</sup>

Figura 2

Paisaje adaptativo resultado de la búsqueda diferenciada de empresas



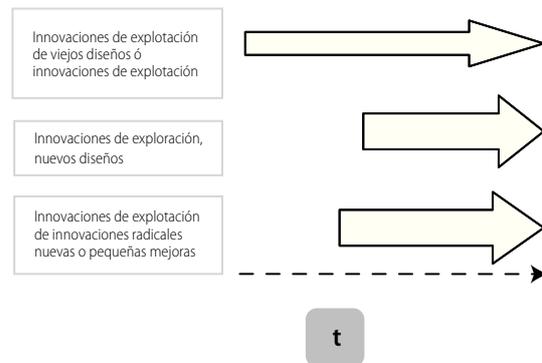
La búsqueda diferenciada (de exploración o explotación de lo adyacente) de nuevos diseños bajo un patrón de competencia trae un paisaje adaptativo, con una combinación de innovaciones radicales e incrementales, lo siguiente que se puede observar es un incremento en diversidad, ¿por qué? El incremento de la diversidad emerge porque una vez que se tiene una innovación radical, esta representa no sólo una sustitución o posible competencia de tecnologías existentes, sino porque es capaz de crear nuevos nichos de mercado. Aunque existe un

nuevo diseño este puede sufrir variaciones por las diferencias en la demanda existente, lo que hace que se incremente la diversidad de diseños debido a mejoras incrementales sobre una nueva tecnología radical.

En este proceso podrían trasladarse varios tipos de innovaciones incrementales de viejas tecnologías, las de radicales, y las de explotación de nuevas tecnologías o que son pequeñas variaciones. En cualquiera de estos casos se da un incremento en la diversidad.

Figura 3

Traslape en el tiempo de diferentes innovaciones en un sector tecnológico



Por lo anterior, las estrategias de buscar nuevos diseños como **la explotación de la vecindad (o exploración de lo adyacente posible) y la exploración de nuevos diseños**, son los mecanismos por los cuales se puede incrementar la diversidad, lo anterior bajo un ambiente de competencia entre empresas.

Las formas de búsqueda tienden a incrementar la diversidad en la exploración y disminuirla en la explotación, y pudiendo resultar en diseños dominantes (Frenken 2006b; Page, 2011). En la exploración existe alta incertidumbre por la aceptación en el mercado de los nuevos productos, y al interior de la empresa por los nuevos procesos organizativos. Una vez seleccionados procesos, productos y organizaciones (una vez que la competencia también

2 Cabe mencionar que el término búsqueda se refiere a un proceso ex ante, donde las empresas buscan nuevos diseños (siendo esta búsqueda de exploración o explotación) que pudieran o no tener éxito en el mercado. Por otro lado, estas innovaciones (diseños) ya sea radicales o incrementales son el resultado de la búsqueda por parte de empresas, la competencia entre ellas y el mercado, siendo las innovaciones un resultado ex-post de la búsqueda. En el Cuadro 2.4, se presenta los tipos de búsqueda de diseños por parte de una empresa, ya sea de forma explorativa o explotativa. Por otro lado, la figura 2.2 representa el impacto de los nuevos diseños (resultado de la búsqueda de las empresas) en el sector tecnológico, siendo innovaciones de exploración o radicales o innovaciones incrementales o de explotación, lo anterior se debe al impacto que tienen en el mercado. El tipo de búsqueda por parte de las empresas y el impacto en el sector son dos cosas distintas, aunque parte del mismo fenómeno, una empresa puede estar haciendo exploración porque los conocimientos tecnológicos no le son adyacentes, sin embargo puede no ser a nivel de mercado algo radical.

participa) la incertidumbre disminuye y existe una mayor certeza del funcionamiento en los mercados. Una vez establecidos estos elementos habrá que pasar a aspectos de cómo se pueden determinar el sector tecnológico de baterías.

## 2. Conformación del sector tecnológico de las baterías

Para conceptualizar a la batería<sup>3</sup> o cualquier otra tecnología en un diseño, se puede pensar que la tecnología es una combinación de elementos (N) y conexiones (K) (Potts:2001). Las combinaciones de estos elementos son las conexiones, también se puede pensar que las combinaciones son los conocimientos para formar una. Lo anterior puede ser representado como:

$$S = (N,K)$$

Donde

**N**: es un conjunto de elementos o componentes y

**K**: son las conexiones.<sup>4</sup>

Considerar los N elementos **a, b y c** y las K conexiones (bidireccionales) posibles son:

**ab, ac, bc.**

3 La batería es un dispositivo compuesto específicamente de varias celdas, las cuales a su vez pueden estar conectadas en serie o en paralelo para entregar energía eléctrica producida por reacciones químicas. Dichas reacciones químicas son producidas por tres elementos electrodos negativos, positivos y un electrolito. Los electrodos están conformados por materiales activos que serán la guía que servirá para formar diferentes baterías

4 En el modelo NK, N eran los genes aquí elementos o componentes de una tecnología, (que no tiene que ver con el término componente gigante usado en el capítulo anterior)

Cada conexión puede representar una tecnología, dado que contiene elementos y conexiones.

Ejemplificando, “N” se puede tomar como el conjunto de elementos de una batería, a y b pueden ser dos metales que al interactuar crean un diferencial de carga generando una chispa. Dicho diferencial de carga es la base de las baterías/pilas/celdas que generan energía eléctrica. De esta forma, los metales a y b tiene la función de ser electrodos de una batería. Las conexiones existentes entre a y b representan a la batería como una tecnología, como una forma de producir energía.

Las baterías están formadas básicamente de 3 elementos o componentes, ánodo, cátodo y electrolito, (el subconjunto [a,b,c]) los cuales se combinan para producir electricidad de forma química, dichos componentes pueden estar hechos de materiales activos como zinc, carbón, níquel etc. Si cada elemento de “N” tiene el mismo “X” número de materiales activos posibles, existirían  $X^N$  posibles diseños o combinaciones de elementos.

**X<sup>N</sup>**: se define como las posibles combinaciones que pueden tomar una tecnología, o los diseños posibles que toma dicha tecnología, denominado como espacio de posibilidades o espacio de diseños posibles.<sup>5</sup> Dicho espacio de posibilidades puede ser incrementado de dos formas; incremento en los componentes (N) o un incremento en las características (X). Los incrementos en X y N, Page (2011:130) los denominó; crecimiento por dimensionalidad (incremento en N o componentes) o por Cardinalidad (incremento en X o características por componente).

5 El espacio de posibilidades crecería por incrementar X o N, las posibilidades aumentarían en mayor medida si se incrementa los componentes, por ser el exponente.

**Cuadro 1**

Componente y Propiedades de dos baterías Zn/C

Batería/ Características	Componente			Propiedades		
	Ánodo	Cátodo	Electrolito	Densidad de Energía	Costo \$	Desempeño a Temperatura
Leclanché	Zn	MnO <sub>2</sub> -C	NH <sub>4</sub> Cl*	1-2 wh/ pulgada cúbica	Bajo	Malo a bajas temperaturas
Cloruro de Cinc	Zn	MnO <sub>2</sub> -C	ZnCl <sub>2</sub>	2- 2.5 wh/ pulgada cúbica	Alto	Normal a bajas temperaturas

\* Cabe hacer mención que el cloruro de cinc también lleva cloruro de amonio en pequeñas proporciones.

Fuente: elaboración propia en base a datos del Battery Application Manual de Eveready Battery Co. Inc. 2001

[http://data.energizer.com/PDFs/carbonzinc\\_appman.pdf](http://data.energizer.com/PDFs/carbonzinc_appman.pdf) (último ingreso 1/10/2016).

66

Aquí se define a la diversidad como los cambios tanto en los atributos de algunas especies (tipos), como altura, color (variación) como entre tipos. Por ejemplo, en una clasificación tecnológica podría ser ejemplificada por la diferencia en dimensiones como peso, forma, energía almacenada de baterías etc.<sup>6</sup> El incremento de diversidad al que se hace referencia en esta investigación de baterías, puede considerarse de dos tipos: 1) Por variedad, cuando se incrementa “X” o la cardinalidad del sistema, existen más características de cada elemento; por ejemplo una nueva forma de batería aparte de la cilíndrica, cuadrada o de botón, podría existir alguna de otra forma; 2) Por tipo, cuando se añade un nuevo componente/elemento N o la dimensionalidad, podría ser resultado de una nueva aplicación que le permita ingresar a un nuevo nicho, por ejemplo para que algunas baterías no dañen la computadora por sobrecalentamiento suelen tener sensores de temperatura que permitan desactivar la conexión entre batería y procesador; el añadir sensores significa un incremento en N, ya que la batería requiere tener nuevos componentes con lo que accedería a un nuevo nicho.

Un ejemplo más específico de incremento de diversidad por variación se puede ver en las baterías de cinc, éstas tienen dos presentaciones, la batería de zinc normal o denominada Leclanché y la batería de cloruro de zinc. En el Cuadro 1 se presentan las características básicas de dichas baterías (en cuanto a sus componentes y propiedades). En ambas baterías, los ánodos son de cinc y los cátodos son dióxido de manganeso MnO<sub>2</sub> con carbón negro pulverizado. Mientras que el electrolito puede ser de cloruro de amonio para aplicaciones normales, y de cloruro de cinc para aplicaciones *heavy duty* (de uso pesado).

Lo anterior puede ser representado en términos binarios (Específicamente en con 0 y 1). El ánodo puede ser representado por un 0 ó un 1, cuando el ánodo tiene sólo cinc es presentado por 0, cuando se combina con plomo se representa por un 1. En el cátodo, el dióxido de manganeso se encuentra combinado con acetileno principalmente (en un principio eran de grafito), lo que varía son las proporciones, una batería de cloruro de cinc contiene más carbón que manganeso proporcionalmente,<sup>7</sup> un cero representa una baja proporción y uno una alta proporción; El último elemento es el electro-

6 Scott Page (2011) señala tres tipos de diversidades, por variación, entre tipos y por diferencia de composición.

7 En la actualidad las baterías Zn/C en general usan acetileno en el cátodo mostrando ser más eficientes por guardar más electrolito

lito, puede presentarse en cloruro de amonio y en cloruro de cinc (0 y 1 respectivamente), esto lo podemos representar en el Cuadro 2. El Cuadro 2 resume del valor que toma cada elemento o componente según su característica. Dadas las características de la batería de cinc-carbon (Zn/C) se pueden tener 8 posibles diferentes baterías (diseños), con dos componentes y 2 características diferentes por componente de la batería (2<sup>3</sup> diferentes baterías).

El Cuadro 3 en su primera columna enumera los diferentes diseños, la segunda, tercera y cuarta señala en términos binarios que característica presenta cada componente. En la quinta columna se da un valor de desempeño a cada batería (que puede representar algún parámetro como densidad de energía), en el que se muestra que la batería de cloruro de cinc (ZnCl<sub>2</sub>) tiene el más alto desempeño. En la última columna y la última fila se presenta las formas en que se puede incrementar la variedad de estas baterías. La aparición de un nuevo material, incrementa la variedad por cardinalidad. Si se añade un componente como el tipo de separador, que puede ser de goma gélida o de cartón y se escoge entre tener una batería cilíndrica o lisa (cuadrada) sería un incremento en la variedad de baterías en su dimensión.

**Cuadro 3**  
Variedad de Baterías

Batería/ Componente	Ánodo	Cátodo	Electrolito	Desempeño
1. Leclanché	0	0	0	.8
2.	0	0	1	<.8
3.	0	1	1	<.8
4.	0	1	0	<.8
5.	1	1	0	<.8
6.	1	0	0	<.8
7.	1	0	1	<.8
8. ZnCl <sub>2</sub>	1	1	1	1

Variedad por Dimensionalidad ----> incremento de componentes

Fuente: elaboración propia

**Cuadro 2**  
Componentes y sus características en binario

Binario/ Componente	Ánodo	Cátodo	Electrolito
0	Zn	MnO <sub>2</sub> -acetileno - %	NH <sub>4</sub> Cl
1	Zn-Pb	MnO <sub>2</sub> -acetileno +%	ZnCl <sub>2</sub>

Fuente: elaboración propia.

Este esquema nos permite de entrada comprender las variaciones dentro de un sector tecnológico, además permite ejemplificar el caso de las baterías, sin embargo caben algunas preguntas, en el siguiente apartado se describirá como podemos medir la diversidad en el sector, y cómo ha variado a lo largo del tiempo.

### 3. Indicadores y datos

La diversidad será medida por el indicador de entropía propuesto por Theil (1965), y que a su vez es coincidente con Shannon y Weaver (1949). Este indicador ayudará a describir los cambios de la diversidad dentro del sector de baterías de 1850 al 2015 a nivel mundial con la ayuda de patentes de Estados Unidos. A su vez, ayudará a explicar la existencia de periodos de exploración y explotación de diseños o tipos de baterías. A mayor diversidad en el sec-

Variedad Cardinalidad  
 ----->  
 Incremento de características

tor, surge un proceso de exploración, una caída del indicador implicaría que se dejó de explorar para explotar algunos diseños.

vo, que forman parte de la batería. De la clase 429, se tomaron 24 subclases que aparecen en el Cuadro 4 (de la subclase 218.2 a la 231.95).

**Cuadro 4**

Subclases tecnológicas consideradas para el estudio

Subclase USPTO	Material activo	Subclase USPTO	Material activo
218.2	Hidrógeno.	230	Amalgamado con mercurio.
219	Plata.	231	Óxido de Zinc.
220	Cobre.	231.1	Calcogenuro de metal de transición.
221	Hierro.	231.2	Carbon, grafito.
222	Cadmio.	231,3	Cobalto alcalido calcogenido.
223	Níquel.	231,4	Carbono y grafito alcalido
224	Manganeso.	231.5	Vanadio, Cromo, Niobio, Molibdeno Titanio o Tungsteno.
225	Plomo.	231,6	Metal de tierra o magnesio.
226	Aleación de uno o más metales.	231,7	Carbón y grafito halogenado.
227	Sulfato de metal o carbonato.	231,8	Carbono, grafito.
228	Oxido de plomo.	231,9	Metal alcalido.
229	Zinc.	231,95	Litio.

68

Los datos que se ocuparon para esta investigación provienen de la base de datos de USPTO, para el periodo 1850 – 2015. Fueron seleccionadas 8 421 patentes que pertenecen a la clase 429 y que se define como: “Aparatos, Procesos y Productos de Producción de Corriente Eléctrica” (USPTO, 2016) Específicamente se seleccionaron 24 subclases (Cuadro 4) de la subclase CCL 218.2 hasta la 231.95), las cuales se definen como el material activo que va dirigida a la estructura de los electrodos de un dispositivo generador de corriente eléctrica.

El material activo en una batería se define, como “el elemento, compuesto químico, o composición los cuales reaccionan químicamente para producir una transferencia de electrones a través de un circuito externo” (USPTO). Dicho material activo, se encuentra en el electrolito y los electrodos positivo y negati-

Por otro lado, a las patentes en USPTO se les asignan una o más subclases tecnológicas debido a las reivindicaciones contenidas en ellas, ya que una invención puede cubrir uno o más campos tecnológicos. Por ejemplo, la patente estadounidense 5620811<sup>8</sup> es una invención que reivindica una batería recargable con mejoras en los electrodos que son de níquel y manganeso. Los examinadores asignaron a esta patente las subclases 429/212; 429/217; 429/223; 429/224. El trabajo que se presenta relaciona “24” de las subclases de la clase 429, por lo que la patente antes citada tiene 2 subclases de las 24 para materiales activos de electrodos.

8 El lector puede ingresar a Google *Patents* y pegar el número de la patente y podrá ubicar la clasificación en la patente en el rubro CCL.

Cuando se le asigna una subclase para contabilizar el número de patentes en cada subclase, aparecerá en el registro de las patentes de níquel (subclase 429/223) y de manganeso (subclase 429/224). Por lo que aparece contabilizada en dos subclases. Esto podría pensarse como un error, pero no es así, ya que una invención puede estar en una o más subclases tecnológicas. Por otro lado, cuando se patenta en más de una subclase tecnológica de materiales activos para electrodos representa: 1) Que la invención abarca tanto níquel y manganeso porque son complementarios en la invención; 2) Que la invención abarca dichos materiales porque son sustitutos. En cualquiera caso, la tecnología recombina dichos materiales activos para formar una invención.

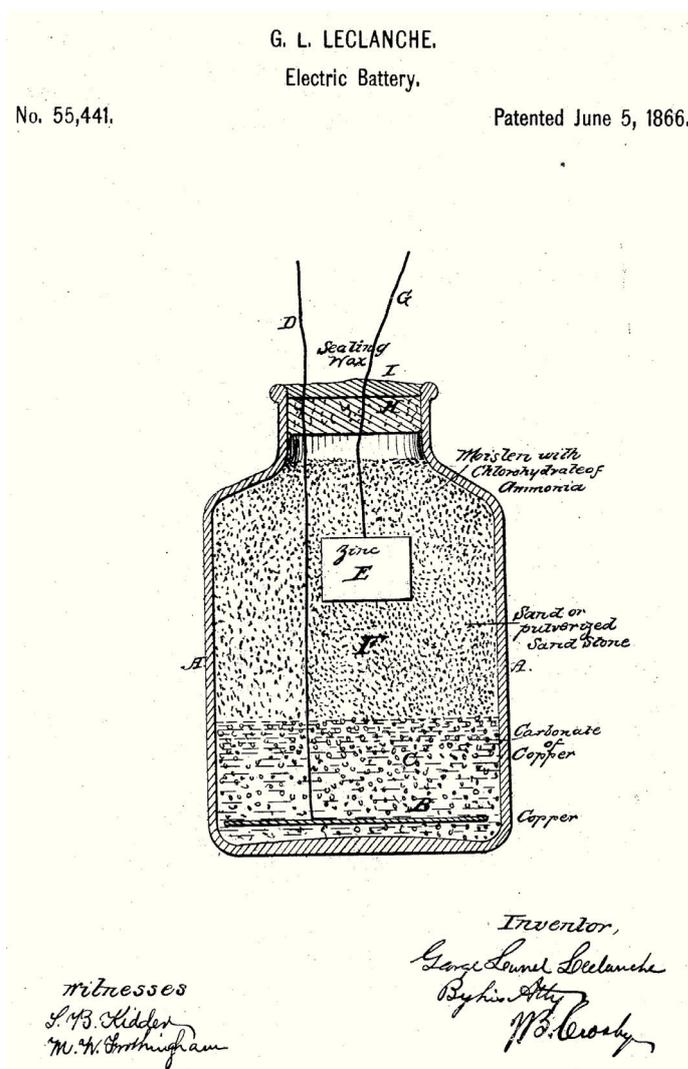
5620811, a dicha relación la denominamos Combinación entre subclases. La intersección de A con B puede ser expresada como la intersección de conjuntos ( $A \cap B$ ), e indica las patentes que tienen ambas subclases y se puede decir que cada combinación de cualquier conjunto de materiales activos representa un tipo de batería distinto.

El siguiente apartado de indicador se basa en los trabajos de Theil (1965), Jenner (1966) Koen Frenken (2001), que miden la diversidad en la economía, con ayuda de la teoría de la información (entropía e información mutua) y que permite medir la diversidad y especialización en un sector tecnológico como el de las diferentes baterías.

Matriz 1										
Subclases	218.2	219	220	221	222	223	224	....	...	231.95
218.2	0									
219		0								
220			0							
221				0						
222					0					
223						0				
224						1	0			
....								0		
....									0	
231.95										0

Para esclarecer más a detalle lo anterior, se puede tomar como ejemplo de nuevo la patente 5620811, y trasladándola en una matriz de 24 x 24 (Matriz 1), en la que en los dos ejes se ubican las subclases que estamos analizando. La matriz señala las interdependencias tecnológicas que existen en las patentes, por ejemplo nuestra patente 5620811, estaría ubicada en la columna 223 y fila 224 (también podría estar en la columna 224 y en la fila 223, pero es suficiente con la parte superior de la matriz). En este caso se puede decir que la subclase 223 está relacionada con 224 por medio de la pa-

Para calcular nuestro indicador de diversidad se parte del concepto de entropía, y se parte que entropía y diversidad son conceptos sinónimos. Al respecto, Phillip Ball (2004) argumenta que la entropía es la medida de las distribuciones menos probables a las más probables. Ball toma como ejemplo un globo inflado con gas. El gas está compuesto por millones de partículas y la velocidad de dichas partículas se encuentra determinada aleatoriamente. Menciona que si se tomara una fotografía de las partículas, ninguna fotografía tomada cada segundo sería una fotografía igual,



debido al movimiento de las partículas. Sin embargo, la distribución espacial dentro del globo sería muy parecida en cada fotografía, dado la velocidad aleatoria de cada una. Por lo que existirían miles de distribuciones espaciales (casi infinitas) muy parecidas. En realidad, la aleatoriedad de la velocidad de dichas partículas es lo que mantiene inflado al globo. Por otro lado, si todas las partículas se colocaran en la mitad de globo, la mitad del mismo permanecería desinflado. Pero las probabilidades de que las partículas tomen una misma dirección son muy bajas o nulas. Los estados muy

parecidos a una distribución aleatoria de las partículas son mucho más probables a el que las partículas tomen una sola dirección por si solas.<sup>9</sup>

Una distribución aleatoria representa una entropía alta, por el contrario una distribución sesgada representa una entropía baja. Bajo este esquema se puede ver que cuando un sólo estado es posible (todas las partículas toman una dirección) la diversidad de diseños es mínima, cuando la distribución es aleatoria, muchos estados son posibles y la diversidad se incrementa. Al respecto Frenken (2000) introduce el concepto de diseño dominante y arquitectura tecnológica de Henderson y Clark (1986). En específico Frenken calcula un indicador de entropía para determinar si existe un Diseño Dominante en alguna industria, dicho indicador es un indicador también de Diversidad Tecnológica. La base de este indicador es el nivel de entropía y el espacio de posibilidades.

La entropía mide el nivel de orden-desorden de un sistema a mayor entropía en el sistema aparece el orden, eso sería igual a que todos los diseño posibles ( $X^N$ ) tendrían la misma probabilidad de aparecer. Un nivel de entropía cero, indicaría que sólo un estado es posible y en sentido tecnológico hablaría de la existencia de un diseño dominante. Un indicador complementario que retoma Frenken es el de información mutua, un nivel alto de información mutua muestra que

9 En realidad el primer ejemplo de entropía fue propuesto por Maxwel. Maxwell quien mencionaba que el movimiento de las partículas de gas en una caja son movidas de un lado a otro por un demonio, ahora denominado demonio de Maxwell.

algunas características de los componentes están coocurriendo (recordemos que alelos son los ceros y unos de los componentes), y un nivel de información mutua de cero diría que no existe coocurrencia, la coocurrencia significa de dos diseños tecnológicos podrían estar dándose en paralelo, Frenken denominó este fenómeno como especialización, debido a que dos fenómenos en paralelo o algunos de ellos, en el caso de las baterías el crecimiento de electrodos.

Frenken (2006), se basó en el planteamiento de Theil y la teoría de la información para medir la entropía en productos. Consideró que la información está medida por la probabilidad de los eventos posibles.

$$h(p_i) = \log_2 \left[ \frac{1}{p_i} \right]$$

donde

**h:** es la cantidad de información proporcionada por la ocurrencia de un evento. Y está en función de la probabilidad de ocurrencia de un evento y es expresada en bits (logaritmo de base 2). **p<sub>i</sub>** es la probabilidad de que un evento ocurra.

Si un evento *i* con una baja probabilidad de ocurrencia sucede la información aumenta, por lo que la cantidad de información es una función inversa de la probabilidad de ocurrencia de un evento.

Entre menos probable sea el evento mayor información es proporcionada (Ver Gráfica 1). Por lo anterior la entropía podría ser considerada como la suma de los valores de información  $h(p_i)$  de cada eventos multiplicada por sus respectivas probabilidades:

$$1) H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 \left[ \frac{1}{p_i} \right]$$

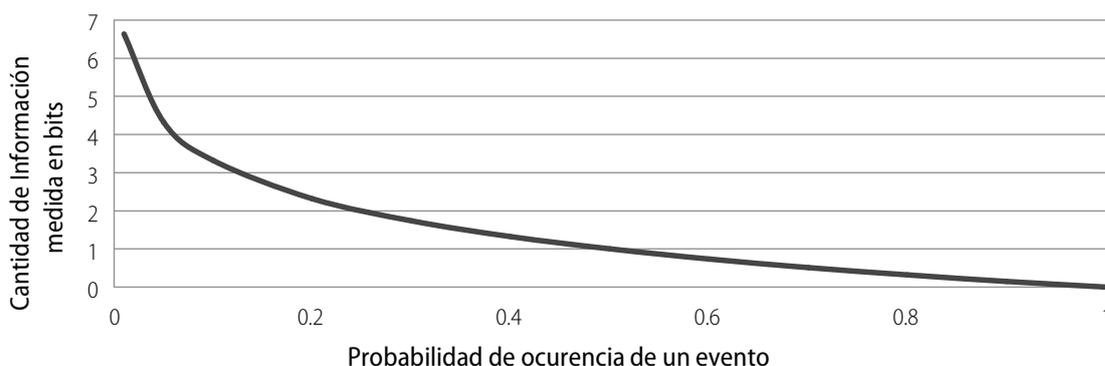
Como se puede observar cuando  $p_i = 1$ , la entropía es mínima o igual cero. Cuando todos los eventos son igual de probables la entropía es máxima. En la misma lógica y como lo que se tomará en consideración son la combinación de diferentes clases tecnológicas, la entropía en un espacio de dos dimensiones puede ser considerada como:

$$2) H(X, Y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} \log_2 \left[ \frac{1}{p_{ij}} \right]$$

### Información Mutua

La Información Mutua es una medida de dependencia entre dos dimensiones, por ejemplo mide si dos eventos tienden a co-ocurrir en particulares combinaciones. Por ejemplo, un

Gráfica 1 Información y Probabilidad de evento



diseño en específico (una combinación en especial) esté siendo representativo. La información mutua es determinada por:

$$3) T(X, Y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} \log_2 \left[ \frac{p_{ij}}{p_i p_j} \right]$$

También puede ser determinado por

$$4) T(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y)$$

La información mutua mide la dependencia entre dos (o más variables o dimensiones) según su nivel de entropía. También es un indicador de especialización, la ausencia de especialización implicaría que  $p_{ij}$  es igual a  $p_i p_j$  para todo  $p_{ij}$ , lo cual resulta en  $T(X, Y) = 0$ .

*Ejemplos de cálculo de entropía e información mutua.*

Considerar 2 componentes por ejemplo electrodos (X y Y), ambos con dos posibles variaciones, o dos características (0,1). Las posibles combinaciones serían 4 (Cuadro 5), en este caso cada combinación sería un diseño diferente.

**Cuadro 5**  
Componente y diseño

Número	Diseño	Componentes		Cantidad	Probabilidad
		X	Y		
1	00	0	0	5.0	0.5
2	01	0	1	0.0	0.0
3	10	1	0	0.0	0.0
4	11	1	1	5.0	0.5
Total				10.0	1.0

Para calcular la entropía bidimensional y la información mutua se necesita primero calcular las frecuencias unidimensionales ( $p_i$  y  $p_j$ ), las cuales son las sumas de las frecuencias bidimensionales sobre una dimensión y se obtiene:

$$P0.=P00+P01 = .5 + .0 = .5$$

$$P1.=P10+P11 = .0 + .5 = .5$$

$$P.0=P00+P10 = .5 + .0 = .5$$

$$P.1=P01+P11 = .0 + .5 = .5$$

donde

P0 es la frecuencia unidimensional o frecuencia de la característica "0" del componente X y

P00 representa la probabilidad de que el diseño 00 ocurra y así sucesivamente.

**Cuadro 6**  
Cuadro de referencia frecuencias unidimensionales

pi, pj	Elementos		Probabilidad
P0.	P00	P01	0.5
P1.	P10	P11	0.5
P.0	P00	P10	0.5
P.1	P01	P11	0.5

Aplicando 2 y 3

$$H(X, Y) = P00 \log_2 (1/P00) + P01 \log_2 (1/P01) + P10 \log_2 (1/P10) + P11 \log_2 (1/P11)$$

$$H(X, Y) = 0.5 \log_2 (1/0.5) + 0.0 \log_2 (1/0.0) + 0.0 \log_2 (1/0.0) + 0.5 \log_2 (1/0.5)$$

$$H(X, Y) = 1$$

$$T(X, Y) = P00 \log_2 (P00/P0.P0) + P01 \log_2 (P01/P0.P1) + P10 \log_2 (P10/P1.P0) + P11 \log_2 (P11/P1.P1)$$

Sustituyendo los valores de los Cuadros

$$T(X, Y) = .5 \log_2 (.5 / .5 * .5) + 0 \log_2 (0 / .5 * .5) + 0 \log_2 (0 / .5 * .5) + .5 \log_2 (.5 / .5 * .5)$$

$$T(X, Y) = .5 \log_2(2) + 0 + 0 + .5 \log_2(2) = 1$$

Para poder valorar con más detalle los indicadores en el Cuadro 7 se describen los indicadores para varias distribuciones.

**Cuadro 7**

Resultados de varias distribuciones, con 4 diseño posibles.

Distribución	Diseño				Probabilidades Unidimensionales				H(X,Y)	T(X,Y)
	0.0.	0.1.	1.0.	1.1.	0.	1.	.0	.1		
A	.25	.25	.25	.25	.5	.5	.5	.5	2	0
B	.33	.33	0.0	.33	.66	.33	.33	.66	1.82	.2634
C	.7	.1	.1	.1	.8	.2	.8	.1	1.44	.1548
D	.5	.0	.0	.5	.5	.5	.5	.5	1	1
E	.9	0.0	0.0	.1	.9	.1	.9	.1	.9379	.4690
F	0.0	1	0.0	0.0	1	0	1	0	0	0

Como se puede observar el incremento en la diversidad tecnológica representado por una distribución más homogénea en los diseños lleva al incremento en el indicador de entropía. La distribución F con “0” en entropía tiene un diseño dominante (el diseño (0.1.), dicho indicador llega hasta a 2 con el diseño con una distribución (distribución A) más homogénea.

En el caso de la información mutua muestra qué tanto se sabe de un diseño teniendo información de otro. Si se considera el valor de la información mutua de la distribución D significaría que el conocimiento de un alelo [0 o 1], a lo largo de una variable o dimensión [X o Y] de un diseño permitiría perfectamente predecir los alelos a lo largo de la otra variable o dimensión. Lo que indicaría también un nivel de especialización o de **co-ocurrencia entre alelos**.

*Cálculo con Patentes*

Dado que se construyó para esta investigación una base de 8,421 patentes, y que se necesita calcular los indicadores anteriores, se consideró que las patentes de materiales activos para baterías podrían encerrar dos funciones: la de

complementariedad o sustitución de los materiales activos. Por lo anterior se tuvo que acoplar el cálculo a la naturaleza de las patentes y la factibilidad de no revisar patente por patente.

Si se tiene 24 subclases tecnológicas designadas a invenciones de baterías tomando en cuenta el material activo de los electrodos, entonces una patente podría estar en al menos una subclase o máximo en todas.

El Cuadro 8 representa dos patentes, en el caso de que se encuentre una patente en una subclase y en todas (de forma hipotética). Las letras en mayúscula representan las subclases a estudiar, y ya mencionadas en apartados anteriores. Los ceros representan cuando la patente no se encuentra en una subclase y los unos cuando se encuentra en alguna. Por ejemplo, la patente que pertenece a una sola subclase, está asignada a la subclase A y se le asigna un 1 en esa subclase. Por el contrario, la patente que pertenece a todas se les asigna un 1 en cada subclase.

Considerando lo anterior se podría tener 2<sup>24</sup> posibles combinaciones de subclases para las patentes. Pero como se verá en el siguiente apartado, el número de combinaciones se re-

**Cuadro 8**

El caso en que una patente está en una subclase o se encuentra en todas.

Sub-clase	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Una	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Todas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1





Sin lugar a dudas un avance importante es la comprobación de algunas hipótesis de los sistemas complejos mediante el uso de las patentes. Sorensen, Fleming y Rivkin (2002), probaron algunas hipótesis de Stuart Kauffman. Por ejemplo, que el conocimiento complejo (conocimiento con un número medio de conexiones) era el que tenía un nivel de aptitud más alto.

Por último, relacionado al tema de diversidad calculada con entropía con base al uso de patentes, Susuki y Fodama (2004) plantearon analizar la diversidad tecnológica con patentes usando el indicador de entropía, sin embargo, existen diferencias sustanciales a la propuesta de éste trabajo, en principio porque Susuki y Fodama plantean que las clases tecnológicas en las patentes son productos distintos pero que no se combinan con otros. En cambio, la propuesta que se plantea aquí es la de la explosión combinatorial: La simplicidad puede tener algunas formas unificadas, pero la complejidad suele tener variaciones (Auyang, 1998:9).

Un sistema complejo, produce variaciones de sí mismo, y esto se debe a que un sistema está compuesto por componentes o elementos que al ser combinados produce variaciones que cumplen la misma función. Tal es el caso de las baterías, que al tener diferentes combinaciones ya sea tomando en cuenta su cardinalidad o dimensionalidad provoca variaciones (que pueden, o no resultar funcionales o útiles). Por lo que aquí se abona en la articulación de explosión combinatorial con la entropía.

#### *Resultados y breve historia de las baterías*

El proceso de desarrollo tecnológico de las baterías ha tenido al menos momentos importantes a lo largo de su historia, y partir de ellos desarrollos posteriores se llevaron a cabo. Estos momentos están relacionados con el tipo de materiales activo de que se han compuesto (Aquí se subrayan los eventos más importantes de cada tipo de baterías) las baterías: Cinc, Plomo, Niquel y Litio.

**1. Baterías de Cinc.** Los primeros estudios sobre baterías fueron realizados por el físico italiano Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, al replantear la investigación realizada por Galvani en 1780. La relevancia de estos estudios se plasmaron en las presentaciones que tuvo Volta en la *Royal Society* de Londres y ante Napoleón y su corte en 1801 (Fara. 2009)). Esto dio pie a una serie de invenciones y mejoras con materiales como cinc, cobre (Frederic Daniell en 1836), platino (William Robert Grove en 1844), y mejoras para evitar la porosidad de la batería (Jean Armand Callaud en 1858). Otro desarrollo fue el de la batería de Lionel Leclanché en 1866 (patentes 55441 y 64113), con materiales como cinc y manganeso fue el sustento de lo que se denominó pila seca, que desarrolló Carl Gassner Jr en 1887 (patente 373,064) teniendo mejoras por M. Jewett de la National Carbon Company que se convertiría en Eveready Co. y que comercializaría en 1896.

**2. Baterías de Acido-Plomo.** La batería ácido-plomo fue inventada por Gaston Planté en 1859, mediante dos tiras de plomo y sumergidas en ácido sulfúrico.<sup>10</sup> Las mejoras de mayor importancia fueron realizada por uno de sus alumnos, Faure (patente 309,838) -quien usó hojas de plomo para el ánodo, y para el cátodo una placa de ácido de óxido sulfúrico (Huggins, 2010)- y la realizada por Sellon (patente 321,759) en 1885.<sup>11</sup>

10 Dicha batería tuvo varias aplicaciones, entre ellas cuchillas para dentistas y cirujanos, lámparas para mineros, timbres eléctricos, señales luminosas en barcos, frenos eléctricos de trenes de vapor y luces de vagones de trenes (Kurzweil, 2010).

11 Las baterías lead-acid son muchas encasilladas en su formato de SLI (por sus siglas en inglés starting, lighting and ignition). Su bajo costo comparado con otro sistema de baterías ha llevado a acaparar este nicho de mercado. Sin embargo, China, como mayor productor de plomo en el mundo, ha ocupado las baterías de plomo como sistema de energía de bici-

**3. Baterías de Níquel.** La batería de níquel-cadmio (Ni-Cd) como hoy se conoce está basada en 3 desarrollos; batería Ni-Cd de Jungner en 1889 (patente 731,309), la de Edison y de Shlecht-Ackermann (desarrollada para aviones pero demasiado tóxica por lo que se prohibió). Ernest Waldemar Jungner inventó la batería de Níquel-Cadmio en 1899 patentada en Suecia y Alemania, la cual fue exitosamente comercializada años después.<sup>12</sup> La batería que desplazó a las Ni-Cd son las de níquel e hidruro metálico (Ni-HM). El desarrollo de ésta batería se basó en las baterías de hidrógeno de mediados de los setenta del siglo pasado y empezó a ser comercializada en 1989, su inventor fue Masahiko Oshitani.<sup>13</sup>

**4. Baterías de Litio.** La historia de las baterías de litio empieza alrededor de 1958 con la invención de una batería **primaria de litio** inventada por W.S. Harris. El litio era el ánodo mientras el cátodo podría ser de cloruro de

---

cletas eléctricas, mejor conocidas como e-bikes, no solamente siendo aplicada por la función de SLI. En 2007 había 44.3 millones de e bikes en uso (Chen y Li, (2009).

12 Algunas de las aplicaciones de la batería de Ni-Cd antes de la llegada de las baterías de litio eran: herramientas eléctricas, telefonía celular, baterías de laptop, aviones jet, calculadoras, máquinas de dictado, reproductores de cassette, grabadoras de audio, cámaras digitales, beepers, cepillos de dientes, control remoto, rasuradores, radios etc (Aifantis, Hackney y Kumar (2010) y Technology and Applied R&D Need for Electrical Energy Storage. Resource Document for the Workshop on Basic Research Needs for Electrical Energy Storage (2007).

13 Algunas de las aplicaciones importantes que hasta inicios de la década pasada se realizaron en teléfonos celulares, laptops, video cámaras, reproductores portátiles de audio, instrumentos de medición, equipo médico y aplicaciones satelitales. hasta 2010 los autos híbridos ocupaban el 53 por ciento del valor del mercado, seguido de herramientas eléctricas. Las dos empresas que más vendían baterías Ni-MH eran Panasonic EV y Sanyo, empresas japonesas que igual que en el caso de las baterías Ni-Cd lideraban el mercado de las Ni-MH.

tionil o dióxido de manganeso. Sin embargo, esta batería era reactiva a electrolitos acuosos, lo que implicaba invertir en seguridad, ergo, sus costes eran elevados (Aifantis, Hackney y Kumar: 2010). El salto de la actividad inventiva de los últimos años se dio con la aparición de baterías de ion-litio, plasmada en una de las patentes más importantes en la historia de las baterías (patente número 5,053,297, inventada por Takayuki Yamahira, Hisayuki Kato y Masanori Anzai de Sony (Aifantis, Hackney y Kumar (2010) y Technology and Applied R&D Need for Electrical Energy Storage. Resource Document for the Workshop on Basic Research Needs for Electrical Energy Storage (2007)). Dicha invención dio pie a una mayor estabilización del litio con el carbón. Una de las particularidades del litio es que permite su combinación con varios tipos de electrodos. Algunas otras baterías de litio son las de litio-polímero y de litio-sodio.<sup>14</sup>

*¿Cómo se puede representar esta breve historia con indicadores?*

En principio se puede partir de la actividad inventiva, como se aprecia en la Gráfica 2, en ella se observan el número de patentes registradas en Estados Unidos relacionadas a materiales activos en baterías de 1847 a 2015, 168 años. En ella se aprecia al menos tres periodos determinados por la tasa de crecimiento promedio anual (tcpa) de patentamiento (Ver Cuadro 10): 1) **1847-1947** con una tcpa de 1.38%, y dos etapas una en la que empieza a emerger el sector y otra donde se vive el periodo entre guerras, este periodo aunque demasiado largo describe la aparición de las invenciones de ba-

<sup>14</sup> En cuanto a aplicaciones las baterías de litio han desplazado a las baterías de Ni-Cd, Zn-C, ZnCl<sub>2</sub>, Ni-MH en dispositivos portátiles; teléfonos celulares, cámaras digitales, GPS, mp3 players. Asimismo se pueden encontrar baterías de litio en autos híbridos y eléctricos como el Prius y Tesla.

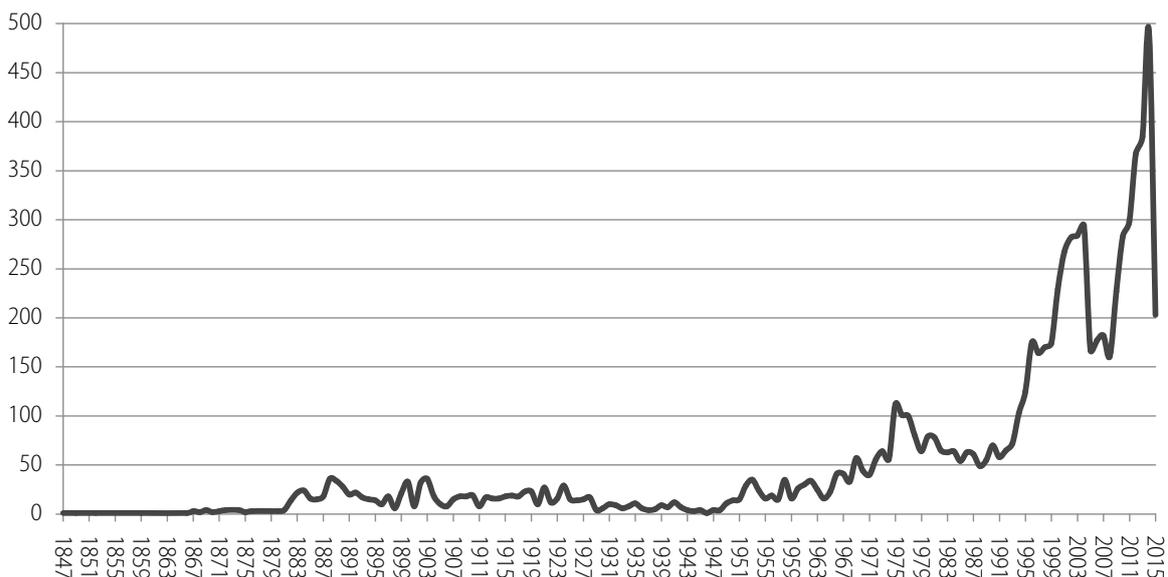


terías y un periodo con muy pocos cambios en dicha época (baterías de cinc, ácido-plomo y de níquel); 2) **1947-1988** con una tcpa de 6.38%, y dos etapas una de auge de posguerra y otra de declive que se corresponde con el periodo de crisis de inicios de los ochenta, dicho periodo se marca por el predominio de las baterías de plomo y níquel; 3) **1989-2014** (2015) con una tcpa de 9.16% es el periodo de mayor auge de patentamiento, influenciado por el auge y consolidación de las tecnologías de la información, teniendo un amplio espectro de aplicaciones: telefonía celular, computadoras, tabletas, reproductores de audio hasta autos, la individualización y la portabilidad necesita de fuente de energía. En ese sentido el último periodo expresado en un número de más de 5,000 patentes en USPTO.

Esta periodización le hace correspondencia también el patentamiento por material activo (Gráfica 3 y Cuadro 11), esto corresponde con la breve historia que se enunció al inicio de este apartado: 1) **1847-1947**, los baterías de materiales activos que más se patentan son de cobre (14.87%), plomo y óxido de plomo y sobre todo de cinc (20.60%); 2) **1948-1988**, los esfuerzos inventivos del periodo quedaron sustentados en baterías de plata (10.90%), níquel (11.12%) y cinc (13.16%); 3) **1989-2014**, en este periodo las baterías de manganeso (10.40%), níquel (11.67%) y del litio (14.98%), en resumen este periodo es el del litio.

**Gráfica 2**

Acumulación Tecnológica en el sector de baterías  
Patentes en invenciones sobre materiales activos 1847-2015



**Cuadro 10**

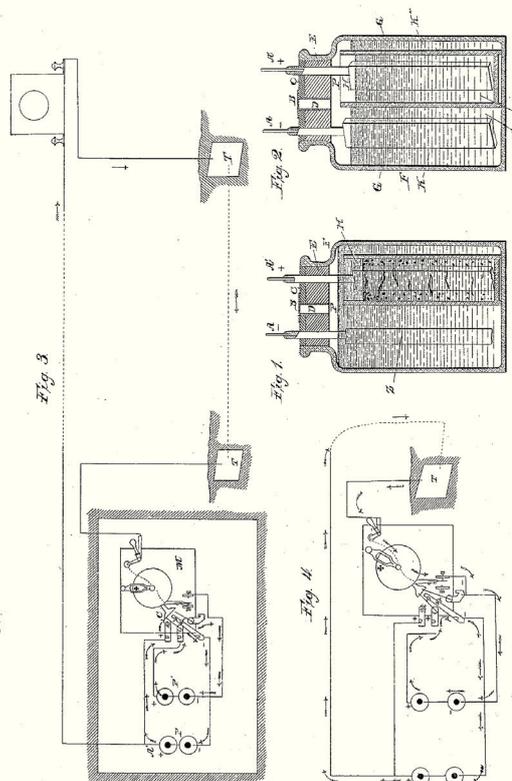
Periodización de la actividad inventiva de baterías en USPTO 1847-2015

Etapas y Periodo	Años	TCPA	Patentes del periodo
Etapa 1	1847-1880	3.38	38
Etapa 2	1881-1947	0	1002
Periodo 1	1847-1947	1.39	1040
Etapa 1	1948-1977	10.94	1132
Etapa 2	1978-1988	-4,358	720
Periodo 2	1948-1988	6.32	1852
Etapa 1	1989-2004	6.93	2587
Etapa 2	2005-2010	11.41	1192
Periodo 3	1989-2014*	9.16	5329
Total periodos	1847-2014*	3.78	8218
	1847-2015	3.21	8421

Fuente. Elaboración propia con datos de USPTO.

\* En 2015, parece que existió una reducción en el otorgamiento de las patentes en USPTO, lo mismo para las subclases citadas por lo que se omite dicho año.

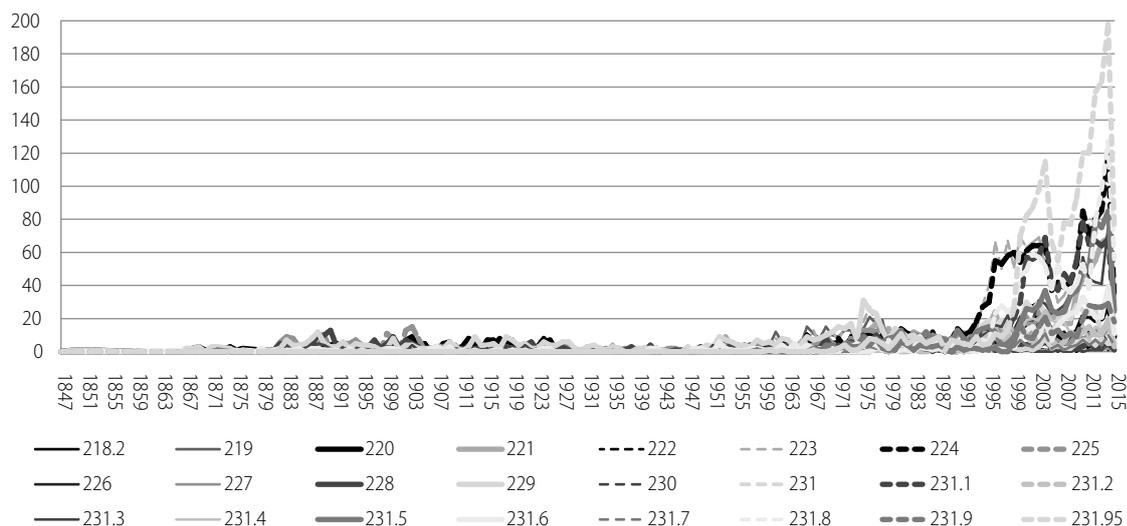
G. L. LECLANCHÉ.  
ELECTRICAL BATTERY WITH PRIMARY AND SECONDARY PILES COMBINED.  
No. 64,113. Patented Apr. 23, 1867.



Witnesses  
J. B. Hildet,  
W. H. Kittingham

Inventor  
G. L. Leclanché  
by Emory Gault  
Attorneys

**Gráfica 3** Patentes por subclase de material activo 1847-2015



**Cuadro 11**  
 Porcentaje de patentes por material activo (periodo suma 100%)

Material	Clase	1847-1947	1948-1988	1989-2015	Material	Clase	1847-1947	1948-1988	1989-2015
Hidrógeno	218.2	0.33	0.44	2.61	Mercurio	230	4.49	2.15	0.19
Plata	219	1.25	10.90	1.96	Óxido de Cinc	231	0.50	1.52	0.70
Cobre	220	14.87	5.12	2.80	Calcogenuro	231.1	0.00	0.85	8.02
Hierro	221	3.57	6.82	5.31	Carbón	231.2	0.00	0.56	1.88
Cadmio	222	1.41	6.34	0.79	Cobalto	231.3	0.00	0.67	5.53
Níquel	223	4.82	11.12	11.67	Carbón Alcalido	231.4	0.00	0.22	2.61
Manganeso	224	6.89	7.71	11.40	Vanadio otros.	231.5	0.42	5.19	6.36
Plomo	225	16.69	7.56	2.33	Metales de tierra	231.6	0.33	3.00	2.85
Aleaciones	226	2.16	1.04	0.61	Carbón halogenado	231.7	0.00	1.08	0.89
Sulfato	227	3.41	0.63	0.29	Otros carbonos	231.8	3.74	2.30	9.01
Oxido de plomo	228	14.53	5.56	0.90	Metales alcalidos	231.9	0.00	2.45	2.48
Cinc	229	20.60	13.16	3.84	Litio	231.95	0.00	3.60	14.98

Fuente: elaboración propia con datos de USPTO.

*¿Todo esto cómo se expresa en la diversidad de baterías?*

En la gráfica 4 se expresa con indicadores la diversidad de baterías medida con patentes. En el caso de diversidad se mide con el indicador de entropía explicado líneas arriba, y el caso de especialización se calculó con el de información mutua (Cuadro 12).

**El periodo de 1847-1947**, estuvo dominado por invenciones en baterías de cinc y de ácido-plomo, lo que sirve como referente para observar la tendencia de diversidad e información mutua. En la gráfica 5.1 se muestra el número de los diferentes tipos de baterías en cada año en dicho periodo, donde se observa un nulo crecimiento en la primer etapa (1847-1880). Sin embargo, existe un crecimiento en los tipos de baterías en la segunda etapa. En la

etapa 1 (1847-1881) existe un promedio de .9 diferentes tipos de baterías<sup>15</sup> por año (ver tabla 5.1), y en la etapa 2 existe un promedio de 7.58. Lo anterior se traduce en un nivel promedio de diversidad de 0.356 y de información mutua de 0.249, en la etapa 1, y en un incremento en la etapa 2 de 2.5 y 1.4 respectivamente. ¿Qué produjo este cambio de diversidad y especialización?

En 1867, cuando se produjo el primer incremento de diversidad e información mutua, Leclanché patentó la primera batería de zinc-carbón que se usa hasta hoy en día. En 1881, cuando inicia el segundo incremento de diversidad Sellon patenta el primer acumulador o batería Pb con electrodo de rejilla. Estas invenciones parecen ser parte fundamental del incremento de diversidad que se dio después de los años en que se dieron dichas invenciones, y como se sabe una prueba de la importancia de dichas baterías es su uso hasta nuestros días. Lo importante de esta transición de un sector tecnológico poco diversificado a uno diversificado es que esto ocurre en un lapso de 4 años (entre 1881-1884) pasando de un índice de diversidad de 1 a 3.29. Después de 1881 el índice crece poco, (respecto a 3.29) siendo el promedio de 2.55. Por otro lado, la información mutua crece también en 1881 y luego se mantiene en promedio en 1.4 en la etapa 2, al menos hasta el final del periodo donde la información mutua alcanza a la diversidad, con lo que se puede decir que las baterías de cinc y plomo han crecido en paralelo. Un proceso de exploración y explotación emerge, cuando las dos innovaciones de exploración o radicales (baterías de cinc y plomo) aparecen, después se buscan mejoras incrementales (de explotación o de exploración de lo adyacente posible) per-

mitiendo que se incrementa la diversidad en un lapso muy pequeño de tiempo (4 años de 100) respecto a todo el periodo.

Desafortunadamente una profunda investigación de todas las innovaciones trascendentes en el sector de baterías es complicada dada toda la literatura. Sin embargo, el ejemplo del periodo anterior, puede dar referentes a la forma de que un sector tecnológico se comporta. Una innovación radical o de exploración se presenta y después de ella le siguen innovaciones incrementales, este proceso impacta en un incremento en la diversidad y después se mantiene o se va reduciendo en un periodo más largo.

**Periodo 1948 – 1988.** Lo descrito arriba puede estar ocurriendo también en el segundo periodo de estudio. No se cuenta con toda la información acerca de las invenciones trascendentes, pero a principios del periodo existe un incremento en los diferentes tipos de baterías llegando a 20 en 1953. Dicho incremento ocurre en un par de años (1951-1953),<sup>16</sup> para mantenerse casi constante después de 1953. En la primer etapa (1948-1977) del periodo, el número promedio es de 19,33 diferentes baterías por año. Este incremento de diferentes tipos de baterías impacta en la diversidad que crece en esos dos años (1951-1953) y luego se mantiene alrededor de ese número hasta el fin de mencionada etapa (1975). La información mutua crece pero no tanto como la diversidad.

En la segunda etapa del periodo (1978-1988), se da otro incremento en el número de diferentes baterías llegando a 50 (en dos años y luego se reduce en toda la segunda etapa).

15 Esto es así porque no hubo invenciones en algunos años del periodo, por otro lado esto no afecta el cálculo de diversidad ya que el cálculo es anual.

16 Aunque como se mencionó no se tiene información del porqué de estos incrementos de diversidad, se puede tener como referente que en 1946, Union Carbide lanzó a la comercialización la batería alcalina recargable de manganeso. Aunque el número de invenciones sobre electrodos de manganeso crece hasta 1989 casi en paralelo con las invenciones en níquel.

Lo mismo pasa con la diversidad, se incrementa en 1976 más que en la etapa anterior y luego durante toda la siguiente se ve reducida después de ese incremento. El promedio de diferentes tipos de baterías por año es de 31, mucho mayor que el de la etapa anterior. La diversidad sigue la misma tendencia, crece antes de iniciar la segunda etapa (1976) y luego durante los diez años siguientes se reduce, mientras que la información mutua crece pero no tanto como la diversidad. En este periodo se puede ver dos incrementos de diversidad en un tiempo reducido y después una constante en ella o su reducción. Surge un proceso de exploración con innovaciones radicales y luego incrementales o de explotación, aunque hace falta evidencia histórica para poder describir dicho proceso.

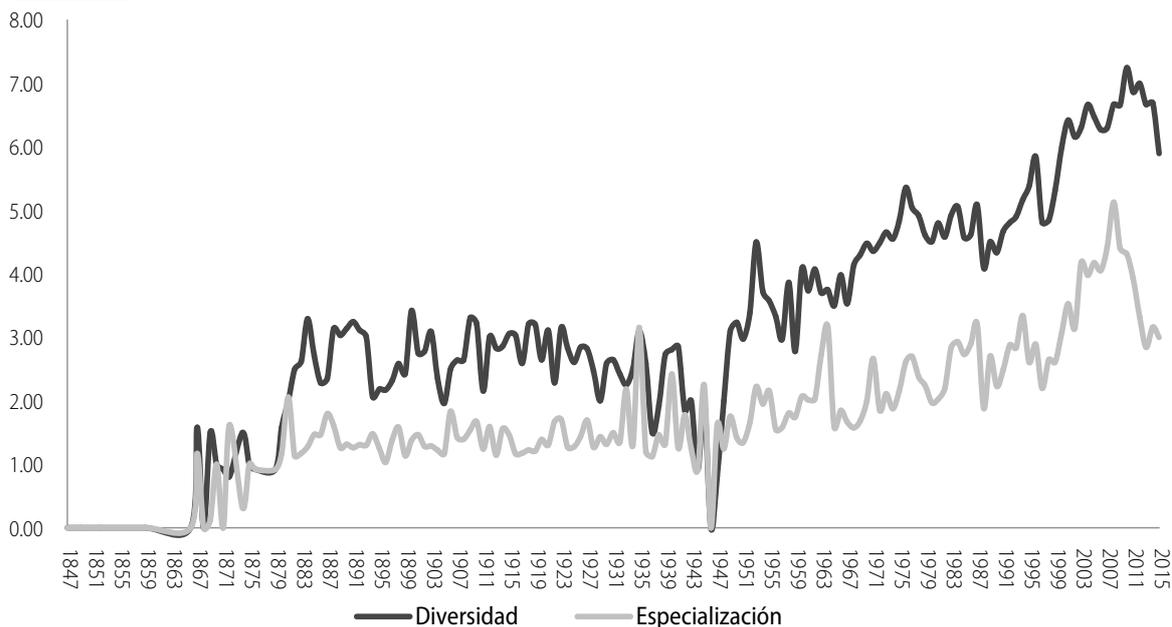
**Periodo 1988-2010.** Este periodo es el más dinámico en términos de patentamiento, con las tasas más altas de crecimiento de los años que conforman el análisis. El crecimiento de diferentes tipos de baterías crece constantemente, con un promedio de 65,87 baterías diferentes al año entre 1989-2004 y de 121,00 entre 2005 y 2014. Esto resulta relevante cuando en el periodo anterior el promedio fue de 23 baterías diferentes al año.

Este crecimiento impacta en la diversidad que pasa a un promedio de 5,88 bits de información en el tercer periodo, llegando a estar 6,26 en el año 2010, como nunca antes había llegado el nivel de diversidad en toda la historia de este sector tecnológico. Por otro lado, el crecimiento de la especialización no parece tener interrupción hasta 2003 donde empieza a crecer, tal vez porque algunos tipos de baterías se empiezan a consolidar y combinar algunos materiales. Una característica principal de este periodo es que se incrementa la diversidad y pareciera no detenerse, como un proceso in-

terminable de exploración, hasta 2010 que empieza a decaer ¿qué ha provocado este incremento de diversidad de baterías como nunca antes en la historia de este sector?

Líneas arriba se señaló que el incremento de la actividad inventiva en este sector tecnológico estaba basado principalmente en las invenciones de electrodos de níquel y litio. En 1989 empezó a ser comercializada la batería de níquel metal hidruro, y en 1991 Sony lanzó al mercado una batería de litio que permitía explotar su potencial voltaje en un sistema no acuoso, que no produjera explosiones (que hoy empiezan a hacer estragos en algunas empresas como Samsung) en las baterías. Parece que estas dos invenciones permitieron un incremento en el patentamiento del sector y por otro lado un incremento en la diversidad como nunca antes se había dado. Por último, el crecimiento de la especialización en el último periodo se puede representar como el crecimiento de las baterías que combinan los materiales activos litio y carbón por ejemplo.

Como se observa los indicadores de diversidad y de especialización crecen casi de la mano, principalmente en los periodos 2 y 3, sin embargo hasta este nivel de análisis no se puede asegurar si es por el crecimiento de las baterías o por componentes específicos, cuestión que queda fuera del alcance de este documento. Como se aprecia los indicadores expuestos nos permiten acompañar la historia de un sector tecnológico, y dan pistas de la situación del mismo, como puede ser una etapa de exploración o de explotación. Cabe añadir que los conceptos de Dimensionalidad ( $N$ ) y Cardinalidad ( $X$ ) enunciados arriba ( $X^N$ ) permiten conceptualizar que el crecimiento de la diversidad se ha dado por el incremento de las dimensiones o componente.

**Gráfica 4** Diversidad y Especialización de combinación de materiales activos 1846-2015

82

**Cuadro 12**

Diferentes tipos de baterías, diversidad e información mutua periodo 1948-1988

	Promedio de diferentes tipos de baterías por año	Promedio indicador de diversidad	Promedio indicador de información mutua.
Etapa 1. 1847-1880	0,90	0,356	0,249
Etapa 2. 1881-1947	7,58	2,552	1,427
Periodo.1847- 1947	5,38	1,827	1,038
Etapa 1. 1948-1977	19,83	3,84	1,92
Etapa 2. 1978-1988	31,63	4,57	2,31
Periodo.1948- 1988	23,00	4,03	2,032
Etapa 1. 1989-2004	65,87	5,11	2,6
Etapa 2. 2005-2014	121,00	6,68	3,97
Periodo.1989- 2014	87,07	5,88	2,9

Fuente. Elaboración propia con base datos de USPTO.

### Consideraciones finales

Como se mencionó arriba los indicadores expuestos como diversidad y especialización usando patentes puede a representar parte de la historia de un sector tecnológico de baterías. También como se mencionó, el texto propo-

ne un uso de indicadores acompañado del uso de patentes, sin embargo también se añade un análisis conceptual de interpretación que permite reconocer parte de los movimientos tecnológicos, asimismo se añade una análisis de la historia de dicho sector. De hecho la propuesta es una metodología del estudio de la diversi-

dad de los sectores tecnológicos a través de las patentes, con una perspectiva de los sistemas complejos, desde en un procesos combinatorial.

Por el lado del estudio de caso, se ha mostrado que las baterías en realidad han incrementado su diversidad, y que esto no ha sido lineal, sino han surgido algunas etapas bien marcadas y que hasta 2010 emergía un proceso de exploración. Por lo anterior el trabajo apunta a abonar a los estudios de medición e historia de la tecnología.

## Bibliografía

- Anderson, Philip y Tushman, Michael L. (1990), "Technological Discontinuities and Dominant Designs: A Cyclical Model of Technological Change", *Administrative Science Quarterly*, 35(4), 604-633.
- Abernathy, William y Clark Kim B. (1985), "Innovation: Mapping the winds of creative destruction" *Research Policy* 14(1), 3-22.
- Aifantis Katerina E, Vasant Kumar y Stephen A. Hackney (2010), *High Energy Density Lithium Batteries, Materials, Engineering, Applications*. Ed. Wiley-VCH. 265 pp. ed.
- Anderson, Philip y Tushman, Michael L. (1990): "Technological Discontinuities and Dominant Designs: A Cyclical Model of Technological Change" *Administrative Science Quarterly*, Vol. 35, No. 4 (Dec., 1990), pp. 604-633.
- Auyang, Sunny (1998): *Foundations of complex-system theories*. Ed. Cambridge University Press. 420 pp. ISBN: 0521778263, 9780521778268.
- Ball, Philip (2010), *Masa Crítica, Versión Original en inglés 2004*, Fondo de Cultura Económica. 600 pp.
- Baldwin Carlis Y. y Clark K. (2000): *Design Rules: The power of modularity*. Ed. MIT Press. 471 pp. ISBN: 0262024667, 9780262024662.
- Benner, M.J y Tushman, M. (2003): "Exploitation, Exploration, and Process Management" en *The Academy of Management Review*, 28 (2). pp. 238-256.
- Comanor, William S., y Scherer. Frederic M. (1969), "Patent statistics as a measure of technical change", *Journal of Political Economy*, 77(3), 392-98.
- Gould, Stephen J. y Eldredge Niles (1972), "Punctuated equilibria: the tempo and mode of evolution reconsidered" *Paleontobiology* 3, 115-155.
- Fara, Patricia (2010): *Alessandro Volta and the politics of pictures* Clare College, Trinity Lane, Cambridge CB2 1TL, UK. *Endeavour* Vol.33 No.4
- Fleming, L., y O. Sorenson (2001): "Technology as a complex adaptive system: Evidence from patent data" en *Research Policy* Forthcoming.
- Frenken, Koen (2000), "A complexity approach to innovation networks. The case of the aircraft industry 1909-1997" *Research Policy* 29, 257-272.
- Frenken, Koen (2006), "A fitness landscape approach to technological complexity, modularity, and vertical disintegration" *Structural Change and Economic Dynamics* 17, 288-305.
- Frenken, Koen (2006), "Innovation, Evolution and Complexity Theory" . Ed. Edward Elgar. Cheltenham U.K. 176 pp.
- Hausman Jerry, Hall Bronwyn y Griliches Zvi, (1984) "Econometric Models for Count Data with an Application to the Patents - R&D Relationship, NBER Technical Working Paper, 17.
- Hall Bronwyn H, Adam B. Jaffe y Manuel Trajtenberg (2004): "The NBER Patent citation data file: Lessons, insights and Methodological Tools" en *Working Paper* 8498 .
- He ZL, Wong PK (2004), "Exploration vs. exploitation: An empirical test of the ambidexterity hypothesis" *Organization Science*, 15(4), 481-494.
- Jaffe, Adam (1986), "Technological opportunity and spillovers of R&D: evidence from firms' patents, profits, and market value" *American Economic Review*, 76, 984-1001.
- Jaffe, Adam (1992), "*Geographic Localization Of Knowledge Spillovers As Evidence by Patent Citation*" Ed. Cambridge: NBER.

- Jaffe, A. y Trajtenberg M. (1998): "International Knowledge Flows: Evidence From Patent Citations" NBER ed. Cambridge.
- Jaffe A. y Hu (2001): "Patent citations and international knowledge flow: the cases of Korea and Taiwan" NBER, Cambridge.
- Jenner, R.A. (1966), "An information version of pure competition" *Economic Journal*, (76) 786-805.
- Kauffman, Stuart A. (1993), *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*, New York and Oxford: Oxford University Press. 300 pp.
- Kauffman, Stuart (1995), *At Home in the Universe: The Search of the Laws of Self-Organizations and Complexity*. Ed. Oxford University Press, New York. 350 pp.
- Kauffman, Stuart A. (2003): *Investigaciones*. Ed. Metatemas. Versión original *Investigations* (2000). 372 pp.
- Kurzweil P. (2010), "Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery" *Journal of Power Sources*, 195, 4424–4434.
- Levinthal Daniel A, March James G. (1993), "The Myopia of Learning" *Strategic Management Journal*, 14, Special Issue: Organizations, Decision Making and Strategy, 95-112.
- Levinthal Daniel A. (1998), "The Slow Pace of Rapid Technological Change: Gradualism and Punctuation in *Technological Change*" *Industrial and Corporate Change* 7(2), 217-247.
- March, James G. (1991), "Exploration and Exploitation in Organizational Learning" *Organization Science*, 2(1), Special Issue: Organizational Learning: Papers in Honor of (and by) James G. March, 71-87.
- Nelson, Richard y Winter Sidney (1982), *An Evolutionary Theory Of Economic Change*. Ed The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge and London 437 pp.
- Page, Scott E. (2011), *Diversity and Complexity*, Ed. Princeton University, 291 p.
- Pakes, Ariel (1985), "On patents, R&D, and the stock market rate of return", *Journal of Political Economy*, 93, 390–409.
- Pavitt, Keit (1984), "Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory" *Research Policy* 13, 343–373.
- Schmookler, Jacob (1951), *Invention and Economic Development*, Unpub Ph. D. Dissertation, U. of Pennsylvania.
- Schmookler, Jacob (1954), "The level of Inventive Activity" *Review Economic Static*, 26.
- Shanon, C. E, y W. Weaver (1949): *The Mathematical Theory of Communications*, University of Illinois Press.
- Sherer , F. M. (1965), "Firm Size, Market Structure, Oportunity, and the Output of Patent Inventions" *American Economic Review* 55.
- Sorensen, O., Rivkin J. y Fleeming L. (2002), "Complexity, Networks and Knowledge Flow", Harvard Business School Strategy Unit, Research Paper. 2(9).
- Susuki, Jun y Kodama Fumio (2004), "Technological diversity of persistent innovators in Japan Two case studies of large Japanese firms", *Research Policy*, 33, 531–549.
- Technology and Applied R&D Need for Electrical Energy Storage. Resource Document for the Workshop on Basic Research Needs for Eectrical Energy Storage (2007). US Department of energy.
- Theil, Henri (1965), "The information approach to demand analysis", *Econometrica*, 33, 67-87.
- Tushman Michael L. y Anderson Philip (1986), "Technological Discontinuities and Organizational Environments" *Administrative Science Quarterly*, 31(3) 439-465.
- Trajtenberg, M. (1990), "A penny for you quotes: Patent Citations", *Rand J. Economic*, 21.
- Verspagen, Bart (2000), "The Role of Large multinationals in the Dutch technology infrastructure patent analysis" *Scientometrics* 47(2).