



Cuadernos del CENDES

ISSN: 1012-2508

cupublicaciones@ucv.ve

Universidad Central de Venezuela
Venezuela

Mercado, Alexis; Córdova, Karenia
Desarrollo tecnológico en baterías e impulsión eléctrica ¿Sistemas tecnológicos disruptivos
promovidos por imperativos ambientales?
Cuadernos del CENDES, vol. 31, núm. 85, enero-abril, 2014, pp. 1-21
Universidad Central de Venezuela
Caracas, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40331800002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Desarrollo tecnológico en baterías e impulsión eléctrica ¿Sistemas tecnológicos disruptivos promovidos por imperativos ambientales?

ALEXIS MERCADO
KARENIA CÓRDOVA*

pp. 1-21

Resumen

Parte importante de las emisiones globales de CO₂ —que en 2011 superaron el nivel crítico para el clima según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de la ONU— proviene del transporte automotor, planteando severos cuestionamientos al sistema tecnológico de locomoción basado en combustión interna. El acelerado desarrollo científico-tecnológico en baterías e impulsión eléctrica está conformando sistemas disruptivos que promoverán industrias nuevas, impactando la economía y pudiendo incluso inducir una revolución tecnológica que modificará la matriz energética imperante. El surgimiento de estos sistemas es impulsado básicamente por factores socioinstitucionales que responden principalmente al imperativo ambiental de disminuir las emisiones de carbono, y ocurre con participación de múltiples actores en diversos ámbitos globales.

Palabras clave

Sistemas tecnológicos disruptivos / Impulsión eléctrica / Ambiente / Matriz energética

Abstract

An important part of global CO₂ emissions—which in 2011 exceeded the critical level for the climate established by the International Panel of Climate Change (IPCC)—are generated by motor transport, and poses major challenges to the technological system of locomotion based on internal combustion. Current scientific and technological developments in batteries and electric drive are generating disruptive systems resulting in new industries that begin to impact the economy. And they might even promote a technological revolution that will change the prevailing energy matrix. Such systems are mainly associated with socio-institutional factors answering to the environmental imperative of reducing carbon emissions, and are being developed by multiple actors in several global regions.

Key words

Disruptive technological systems / Electric drive / Environment / Energy matrix

* A. Mercado: profesor-investigador del Área de Ciencia y Tecnología del Centro de Estudios del Desarrollo, Cendes, de la Universidad Central de Venezuela.

Correo-e: alexisms60@gmail.com

K. Córdoba: profesora-investigadora del Área de Energía y Ambiente del Instituto de Geografía y Desarrollo Regional, Facultad de Humanidades y Educación de la Universidad Central de Venezuela.

Correo-e: karenia@gmail.com

Introducción

Es incuestionable que desde la década de los ochenta del siglo pasado se viene implantando un paradigma tecnoeconómico basado en la microelectrónica, afianzado más recientemente por la difusión de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) (Pérez, 2010). Este paradigma, que sustituye al que prevaleció desde la posguerra, caracterizado por el uso intensivo de energía y materiales, se sustentaría más en la agregación de valor vía conocimiento que en la incorporación y transformación de materiales, lo que supondría una atenuación en la explotación desmesurada de recursos naturales, uno de los factores que más atenta contra las posibilidades de alcanzar modos de vida más sustentables.

Sin embargo, aun cuando ciertamente el producto industrial se basa cada vez más en el conocimiento, la economía global continúa consumiendo recursos naturales de forma poco sostenible. De esta manera, y a pesar de los innumerables esfuerzos realizados desde diversos foros internacionales y nacionales para atenuar los efectos de las actividades antrópicas, es evidente el incremento de la degradación socioambiental (Mercado y Córdova, 2005). Esto llevaría a cuestionar muchos de los sistemas tecnológicos en los que se asienta la estructura económica.

En 2011, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) superaron el nivel crítico de 32 gigatoneladas, estimado por expertos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por su denominación en inglés) como el máximo que todavía haría manejable la situación climática global (IEA, 2011), por lo que es imperativo modificar la matriz energética asentada en los combustibles fósiles. Una revisión sectorial muestra que el transporte aporta el 20 por ciento de las emisiones, cuyas dos terceras partes (alrededor del 14 por ciento) corresponden al transporte terrestre (Herzog, 2009).

La magnitud del problema dificulta mantenerse dentro de trayectorias tecnológicas basadas en energías fósiles. En este escenario, la legislación emerge como herramienta expedita para aminorar los impactos de las actividades antrópicas, destacándose que las prácticas regulatorias han inducido el desarrollo de tecnologías para reducir el impacto ambiental de la industria (Geffen, 1995), de donde cabría preguntarse si el imperativo de disminuir el impacto ambiental global puede impulsar acuerdos internacionales y legislaciones que promuevan la transformación de la estructura sociotécnica de la locomoción.

Los avances en tecnologías de baterías y en la impulsión eléctrica, sumados al incremento del ritmo de la innovación en diversas fuentes energéticas más limpias, abren posibilidades de modificar las trayectorias tecnológicas de locomoción basadas en energías fósiles. Actualmente, una multiplicidad de innovaciones disruptivas presuponen la transformación de diversos sistemas tecnológicos¹ y, aunadas a importantes cambios en la legislación ambiental

¹ Adoptando la definición de Hughes (1987), quien considera que los sistemas tecnológicos están integrados por componentes técnicos (artefactos y procesos de producción) y organizacionales (empresas manufactureras, de asistencia técnica y financieras), y que incluyen

e industrial, sugieren una transformación en la locomoción automotora e incluso cambios en el paradigma tecnoeconómico (Pérez, 2002). Estos sistemas tecnológicos disruptivos, relacionados, pueden impulsar una revolución tecnológica, definida como un conjunto de innovaciones radicales que conforman una constelación de tecnologías interdependientes; un sistema de sistemas tecnológicos (Pérez, 2010) que puede modificar radicalmente la matriz energética.

Foladori e Invernizzi (2009) destacan tres dimensiones que deben considerarse a efectos de establecer la irrupción de una revolución tecnológica, que bien pueden ser aplicables al surgimiento de sistemas tecnológicos disruptivos. A saber: las características técnicas que confieren ventajas a las tecnologías emergentes frente a las vigentes; el papel de la nueva tecnología en la acumulación de capital, y su impacto en los diferentes actores sociales. Como se mostrará, el desarrollo de las tecnologías, asociadas a las baterías y a la impulsión eléctrica, impacta significativamente en todas ellas.

En el presente artículo se presenta, en primer lugar, una breve descripción histórica del desarrollo del vehículo eléctrico y algunos avances de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en baterías e impulsión eléctrica, a objeto de analizar la emergencia de sistemas tecnológicos disruptivos, cuyos rasgos principales serían:

- ser impulsados por factores socioinstitucionales que responden a imperativos ambientales;
- generar importantes modificaciones de actividades que anteriormente estaban atadas a fuentes fijas de energía,
- que las innovaciones se desarrollan en diversos ámbitos globales asociados a los diferentes bloques económicos.

En segundo lugar se analiza cómo las políticas ambientales estimulan innovaciones en la generación y uso de la energía que modificarán la matriz energética, coadyuvando a la irrupción de un nuevo paradigma tecnológico de la locomoción. Por último, se revisan los esfuerzos que realizan empresas de las industrias automovilística y eléctrica para entrar tempranamente en esta renovada área de la producción, elemento que refuerza la tesis de la conformación de sistemas tecnológicos disruptivos.

Locomoción eléctrica, ¿nueva tecnología?

Puede sorprender, pero el desarrollo del vehículo eléctrico antecede en unas cuantas décadas al del vehículo de combustión interna. En 1830 el inventor holandés Sibrandus Stratingh diseñó un pequeño carruaje eléctrico que algunos autores consideran el precursor del carro eléctrico. Justo en esa década varios inventores en Europa y Estados Unidos desarrollaron

componentes científicos como bibliografía especializada y programas de enseñanza. Y pueden abarcar, incluso, elementos de legislación como normas regulatorias.

también artefactos de locomoción eléctrica, por lo que existen controversias con relación a quién es el creador original de este vehículo. El escocés Robert Anderson creó el primer carro con motor eléctrico entre 1832 y 1839, y en 1835 Thomas Davenport, en Estados Unidos, construyó un pequeño auto que trabajaba con electricidad (Romero, 2009).

Casi sesenta años más tarde, William Morrison fabricó el primer vehículo eléctrico que tuvo éxito comercial. El aparato estaba equipado con un motor de 4 caballos de potencia, suministrada por una batería de 24 celdas.² Los principales atributos de su desempeño eran una velocidad máxima de 22 kilómetros por hora y una autonomía de 48 kilómetros por carga (ibíd.). En los años siguientes se desarrollaron modelos que atraían más a los usuarios que los vehículos de combustión interna, sobre todo porque los segundos tenían problemas de seguridad debido a combustión y explosiones.

En la primera década del siglo XX era frecuente observar vehículos eléctricos en ciudades de Estados Unidos. Para 1911, el más popular era el Detroit Electric, que podía estar equipado con baterías de níquel-hierro (Ni-Fe), desarrolladas en la década precedente por Thomas Edison; alternativas a las mucho más pesadas y poco eficientes de plomo-ácido. Cabe destacar que la mayoría de los vehículos híbridos (gasolina-electricidad) vendidos en la actualidad utilizan baterías de este tipo.

Elementos económicos y técnicos fueron determinantes para la imposición del artefacto de combustión interna. En el primer caso, la estandarización y producción en masa de los Ford modelo T permitía que estos tuvieran un precio de seiscientos dólares, muy inferior al Detroit Electric, que era cuatro veces más costoso. Además de la diferencia en precio, la autonomía de los vehículos de combustión interna era mayor —más recorrido por carga de combustible— y la conformación de una amplia estructura de distribución de los combustibles fósiles ofrecía la posibilidad de desplazarse en grandes distancias. En el segundo caso tenemos la invención del encendido eléctrico en 1912, avance importante para los usuarios porque eliminó el engorroso encendido manual. Paradójicamente, una invención eléctrica contribuía a imponer el vehículo de combustión interna y a la discontinuación de la producción de vehículos eléctricos.

En las siguientes seis décadas se consolida el paradigma tecnológico de locomoción por combustión interna. La industria automotriz se convirtió en uno de los sectores más dinámicos de la economía y en el sector productivo icónico del paradigma tecnoeconómico basado en el uso intensivo de materiales y energía. No será sino a partir del primer *shock* petrolero en 1973 cuando se vuelva la atención a los vehículos eléctricos y, en un lento pero progresivo proceso de coevolución de los sistemas físico, tecnológico, institucional y

² Cada celda es una batería primaria (pila), compuesta por dos electrodos, que conectada en serie, conforma una batería secundaria que tiene la capacidad de ser recargada.

de conocimiento (Hadfield y Seaton, 1999), se perfila, después de casi cuarenta años, un cambio en el paradigma de la locomoción.

Incremento de la investigación y desarrollo tecnológico

Una revisión de las áreas de conocimiento científico-técnicas vinculadas a baterías, materiales e impulsión eléctrica permite identificar importantes avances en el presente siglo, principalmente en torno al litio, el elemento metálico más liviano que existe, y al grafeno, material de carbono identificado hace apenas diez años. La baja densidad del litio hace posible fabricar baterías de menor peso que las convencionales (plomo/ácido o incluso níquel/hierro), que poseen alta densidad de energía (definida como la cantidad de vatios-hora que pueden ser almacenados por kilogramo de batería) y buena densidad de potencia eléctrica (cantidad de energía que puede ser liberada en un período de tiempo determinado) (Canis, 2011). El grafeno, estructura de carbono monocristalina plana de un átomo de espesor, posee dos importantes cualidades: ser un material liviano de gran resistencia y tener propiedades semiconductoras.

Tendencias en la investigación y desarrollo

Específicamente en baterías, gran parte de la investigación gira en torno a la síntesis de sales de litio para elaborar electrodos (ánodos y cátodos) y electrolitos (medio donde fluyen los iones, produciendo la electricidad a partir de la energía química acumulada en el acumulador). El objetivo es desarrollar materiales que mejoren el desempeño de las baterías (Scrosati y Garche, 2010). En cuanto al grafeno, los trabajos se orientan en dos direcciones: desarrollo de materiales para optimizar el desempeño de diferentes componentes de las baterías (electrodos y membranas) y estructuras para la fabricación de piezas y dispositivos de recuperación de energía, y el desarrollo de supercapacitores (condensadores capaces de acumular grandes cantidades de energía). En electroquímica, las investigaciones se concentran en optimizar procesos de óxido-reducción en diferentes estados (v. cuadro 1).

La mayoría de estos esfuerzos se apoyan en la nanotecnología, que permite elaborar «nuevos productos» basados en estructuras en la escala del nanómetro debido a que, aun cuando son materiales con la misma composición química, presentan estructuras diferentes que les pueden conferir distinta funcionalidad.

A objeto de estimar el peso de estas áreas de investigación, se procedió a revisar información del Science Citation Index. En el informe de Thomson Reuters, empresa responsable de esta base de datos (King y Pendlebury, 2013), en el que identifican las cien líneas de investigación (*research fronts*) más importantes en la actualidad,³ se observa que «baterías

³ Organizadas en diez grandes clasificaciones disciplinarias: agricultura y ciencias de plantas y animales; ecología y ciencias ambientales; geociencias; medicina clínica; ciencias biológicas; química y ciencia de los materiales; física; astronomía y astrofísica; matemáticas, ciencias de la computación e ingeniería; economía, psicología y otras ciencias sociales.

recargables de litio-aire de alta energía» ocupan el primer lugar entre los diez frentes correspondientes a la clasificación «Matemáticas, Ciencia de la Computación e Ingeniería»; esto con un total de 49 artículos centrales (primer lugar conjuntamente con otros dos frentes), cuyo año promedio de publicación es 2011 (2010,8), recibiendo 2.006 citas (tercer lugar en número). Por su parte, «nanoalambres de silicona para ánodos de baterías de ión-litio» es el décimo frente de la clasificación «Química y Ciencia de los Materiales», con 50 artículos centrales (primer lugar en número), año promedio de publicación 2010 (2010,3) y 2.896 citaciones (segundo lugar en número).

Cuadro 1

Avances de investigación en química y materiales útiles para incrementar la densidad de energía y potencia en baterías y en el desarrollo de la impulsión eléctrica

Área	Avance	Utilidad
Materiales	Uso del grafeno como material para la acumulación de energía.	Nuevos materiales para almacenamiento y recuperación de energía.
Materiales	Síntesis de sales de litio-óxido de titanio y litio-silicón para la fabricación de electrodos.	Incremento de la densidad de energía y la densidad de poder de las celdas.
Materiales	Estructuras sándwich grafeno-silicón-grafeno mediante procesos nanotecnológicos para fabricación de ánodos.	Incremento significativo de la densidad de energía y la densidad de poder de las celdas.
Materiales	Desarrollo de nanotubos compósitos de carbono-polímeros para fabricación de ánodos.	Incremento de la conductividad.
Materiales	Desarrollo de membranas conductoras para ser usadas como electrólitos.	Incremento de la confiabilidad y seguridad de las celdas.
Materiales	Nuevos materiales de grafeno.	Materiales para la fabricación de carrocerías que almacenen energía.
Electroquímica	Reversibilidad de las reacciones de óxido-reducción de los electrodos de litio en medios electrolíticos.	Incremento de la conductividad y extensión de la vida útil de las baterías.
Electroquímica	Soluciones orgánicas y líquidos iónicos como electrolitos.	Mejorar la conductividad y la seguridad.
Dispositivos	Supercapacitores basados en nanotubos de carbono.	Nuevos dispositivos para almacenamiento de energía.

Fuente: elaboración propia.

Incremento del ritmo de innovación tecnológica

Si los avances en investigación son importantes, no lo son menos aquellos en desarrollo tecnológico, concentrándose en tres áreas clave:

1. incremento de las densidades de energía y potencia de las baterías;
2. mejoras en la seguridad de los artefactos;
3. innovaciones mecánicas y de control en los automóviles.

En el primer caso, se desarrollan nuevas técnicas de fabricación de electrodos para producir baterías para diversos usos, entre las que destacan: las de litio-manganeso, cuyas características principales son bajo peso y capacidad de operar en un amplio intervalo de temperaturas; baterías de ión-litio, ligeras, de alta potencia; baterías de Li-polímero, fabricadas con las mismas sales que las de ión-litio, pero que usan electrolito de polímero en lugar de líquido, lo que incrementa su densidad de energía. Las baterías Li-aire, que pueden acumular mayor cantidad de energía, todavía no alcanzan producción industrial debido a que no se han logrado resolver los problemas de los ciclos de recarga, aún muy bajos, y la deposición de subproductos en los electrodos que disminuyen la conductividad (Christensen y otros, 2012).

Las innovaciones han incrementando de manera importante la capacidad de acumulación de energía (Ah), disminuyendo los costos de almacenamiento y provisión de energía (kilovatios-hora). La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y la Agencia Internacional de Energía (IEA por su denominación en inglés) han estimado que los valores presentes en 2012 se habrán reducido a la mitad para 2020 (OECD-IEA, 2009). Por su parte, un informe de la consultora McKinsey (Hensley y otros, 2012) estima que los avances tecnológicos en cátodos, ánodos y electrolitos podrán aumentar la capacidad de las baterías entre un 80 y un 110 por ciento para el período 2020–2025, lo que se traduciría en una reducción del 40 al 45 por ciento en el precio de las baterías.

Un ejemplo concreto de estos avances tecnológicos es el de la empresa Envia Systems, de Estados Unidos, que en 2012 desarrolló una celda electrolítica de litio que acumula tres veces más energía que las celdas actuales (Singh, 2012), lo que hace factible que se alcancen las citadas proyecciones.

La seguridad es crucial en el desarrollo de las baterías. En esta área la I+D se orienta a disminuir los riesgos de explosiones. El problema radica en que el incremento de la seguridad resulta en una disminución de la disponibilidad de energía, por lo que se trabaja en la composición de los electrodos para optimizar el equilibrio entre disponibilidad de energía y seguridad, y en el incremento de esta en los electrolitos mediante la incorporación de aditivos para aumentar la estabilidad térmica y la eliminación de solventes orgánicos peligrosos, a objeto de disminuir la toxicidad (Scrosati y Garche, 2010).

En el caso de innovaciones mecánicas y de control, se registran avances en el desarrollo de motores eléctricos de alta velocidad que disminuyen la pérdida de energía aerodinámica (MIT, 2013), materiales para la construcción de los vehículos y desarrollo de mecanismos para el aprovechamiento de la energía generada. Un ejemplo es el proyecto *Intelligent Dynamics for Fully Electric Vehicles* (ID4EV, 2010), esfuerzo de I+D conjunto Academia-industria, cofinanciado por la Comisión Europea, cuyo objetivo es desarrollar sistemas eficientes de frenado y chasis. El concepto que se maneja es que los sistemas trabajen de manera integrada bajo control distribuido para optimizar el desempeño. Destacan también esfuerzos para mejorar una importante ventaja de los sistemas de impulsión eléctrica respecto a los de combustión interna: el control más rápido y preciso del torque generado. Los sistemas actualmente en desarrollo apuntan no sólo a garantizar la mayor efectividad del torque, sino también a mejorar condiciones de seguridad (Yin y Hori, 2009).

Este cúmulo de avances tecnológicos permite una lenta pero creciente introducción de vehículos eléctricos. Por sólo citar algunos ejemplos, la empresa china BYD, líder mundial en producción de baterías, lanzó en 2009 el BYD E6, que trabaja con baterías de hierro-litio, con los siguientes parámetros de desempeño: autonomía, 300 kilómetros; velocidad máxima, 160 km/h; ciclos de recarga de baterías, 2.000 veces; cero emisiones por uso (Energy & Capital, 2012). La francesa Renault lanzó en 2012 el Zoe, impulsado por baterías de ión-litio, considerado el primero que reúne las condiciones para ser producido en masa en la Eurozona, con los siguientes parámetros de desempeño: autonomía, 210 kilómetros; velocidad máxima, 135 km/h; cero emisiones por uso. Por su parte, la empresa estadounidense Tesla, dedicada exclusivamente a producir vehículos eléctricos, lanzó al mercado en 2012 el Modelo S, el cual tiene una autonomía de alrededor de 400 kilómetros, velocidad máxima superior a los 200 km/h y cero emisiones por uso.⁴

¿La transformación de los sistemas puede promover una revolución tecnológica?

Como se aprecia, las innovaciones apuntan en muchos casos a resolver problemas o limitaciones que presentan las tecnologías en desarrollo, situación que coincide con lo señalado por Carlota Pérez (2010) respecto a que las innovaciones individuales no se dan de manera casual y tienden a generarse en el entorno de otras innovaciones. Esto lleva a analizar si tienen suficiente carácter transformador para modificar sistemas tecnológicos de diferentes sectores de la producción y propiciar una revolución tecnológica. Una revolución tecnológica es el surgimiento de un «poderoso y visible conjunto de tecnologías, productos e industrias

⁴ Cfr. <http://media.caranddriver.com/files/2013-tesla-model-complete-specs.pdf>.

nuevas y dinámicas, capaces de sacudir los cimientos de la economía y de impulsar una oleada de desarrollo de largo plazo» (Pérez, 2002). Tienen impacto profundo y universal, no sólo porque abren un nuevo y dinámico potencial para la creación de riqueza, sino porque ofrecen tecnologías genéricas que permiten dar un salto cuántico en la productividad de otras actividades económicas y, a nuestro entender, inciden en diversos ámbitos sociales a escala global.

Las principales características que distinguen estas tecnologías de las precedentes (Foladori e Invernizzi, 2009) es que son mucho menos contaminantes y más ahorradoras de energía. Uno de los factores que fomentan el desarrollo de las tecnologías de baterías e innovaciones en la impulsión eléctrica es la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), observándose que tienden a integrarse cada vez más con fuentes de generación más limpias. Las fuentes alternas de energía han servido hasta ahora para complementar las tradicionales, razón por la que no han propulsado, hasta ahora, una transformación profunda de la matriz energética. Sin embargo, en las fuentes solar y eólica se registran importantes avances. Específicamente en el caso de la energía eólica, las nuevas turbinas que se construyen producirán un 20 por ciento más de energía que las actuales de 5 MW (7 MW), en tanto que las que están en desarrollo, el doble (10 MW), lo que ampliará significativamente su participación en la generación total de electricidad (Kamada y Mikelsen, 2011).

En paralelo a este esfuerzo, algunos países comienzan a modificar sus redes de energía. Dinamarca, nación líder en generación de energía eólica, está rediseñando su red para, entre otras cosas, usar los vehículos eléctricos como unidades de almacenamiento de energía, a fin de compensar las fluctuaciones de intensidad de esta fuente, aprovechando los períodos de poca actividad. La versatilidad de aprovisionamiento, disminución de costos de los servicios auxiliares de la red y mayor integración con fuentes de electricidad renovables serán decisivas para la difusión e implantación definitiva de la impulsión eléctrica (The International Council on Clean Transportation, 2013).⁵

Lo anterior evidencia que se comienza a modificar la matriz energética, trayendo aparejado la creación de nuevos sectores de la producción y nuevas infraestructuras de servicios interconectadas e interdependientes, capaces de incidir en el resto de la economía, característica que distingue a las revoluciones tecnológicas de un conjunto aleatorio de sistemas tecnológicos (Pérez, 2010).

Esta reconfiguración de los sistemas tecnológicos alrededor de la impulsión eléctrica tendrá repercusiones importantes sobre diversos actores sociales en el ámbito global

⁵ Incluso, aun cuando la energía eléctrica provenga en un 100 por ciento de plantas termoeléctricas, la huella de carbono del vehículo eléctrico es 28 por ciento menor que la del de combustión interna (Gani, s/f)

(Foladori e Invernizzi, 2009), empezando por los impactos socioculturales y ambientales que tendrá en los lugares de explotación de materias primas, en diversos casos negativos, pero también en la distribución de los combustibles para el transporte, disminuyendo el riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores y usuarios.

En el mediano plazo, la reconfiguración de la estructura sociotécnica de la locomoción y la modificación de la matriz energética generarán cambios en la acumulación del capital y el empleo. Algunas proyecciones técnicas y económicas desarrolladas en la Unión Europea (Cambridge Econometrics y Ricardo-AEA, 2013) contrastan el impacto del incremento de los costos de capital derivados de un mayor gasto en tecnología de vehículos eléctricos, en especial de las baterías, con el de la reducción de los gastos de importación de petróleo. En el primer caso, se estima que afectará el ingreso real e incrementará los gastos de los consumidores. Sin embargo, los costos para la economía en su conjunto se equilibran, porque parte de esos gastos se traducirán en beneficios para empresas europeas productoras de los diferentes componentes, retroalimentando la economía. En contraposición, la disminución del consumo de combustibles fósiles tendrá un impacto más amplio en la economía, debido a la mejora en la balanza comercial por reducción de las importaciones y a beneficios secundarios derivados de menores gastos en combustibles para los consumidores, que incrementarán su capacidad adquisitiva (ibíd.).

Rasgos de la revolución tecnológica

Aportados suficientes elementos técnicos y económicos que evidencian la transformación de diversos sistemas tecnológicos de la impulsión eléctrica que pueden promover una revolución tecnológica, se exponen a continuación los rasgos que la caracterizarían.

La revolución microelectrónica ha tenido impacto global, transformando múltiples actividades económicas y sociales. Pero su expansión ha sido posible gracias al desarrollo de fuentes de energía autónomas de pequeño tamaño debido al incremento de las densidades de energía y potencia, lo que le confiere a la electroquímica un rol estratégico. El litio, por su buena relación densidad de potencia/densidad de energía, permite miniaturizar las baterías, posibilitando desarrollar artefactos electrónicos cada vez más pequeños.

Esta cualidad ha hecho posible cambios importantes en el diseño y uso de aparatos, y el desarrollo de una enorme cantidad de nuevos dispositivos tecnológicos que están transformando múltiples ámbitos de la dinámica social como la salud, la recreación, y sectores de la producción y el comercio. Teléfonos celulares, tabletas electrónicas, GPS, reproductores de música, facturadores inalámbricos, marcapasos y aparatos portátiles para cuidados intensivos, por citar algunos, son posibles gracias a la miniaturización de las baterías, en especial de las de litio.

Un primer rasgo que caracterizaría a esta revolución tecnológica es la movilidad que propicia lo portátil, resultando en modificaciones de actividades que anteriormente estaban atadas a fuentes fijas de energía. Este atributo está transformando hábitos y percepciones de los individuos, evidenciando el gran impacto social de estas innovaciones tecnológicas.

La aceleración del ritmo de innovación en torno a los vehículos eléctricos en buena medida es impulsada por la necesidad de disminuir las emisiones de GEI. Esta sería la segunda característica de esta revolución tecnológica: ser promovida por factores socio-institucionales que responden a imperativos ambientales. La nueva revolución tecnológica está indisolublemente asociada al imperativo de la sustentabilidad.

Difusión de las innovaciones

Asociada a la idea de revolución tecnológica está el aceleramiento del ritmo de la innovación. Si bien la tecnología de impulsión eléctrica es antigua, se está ante una constelación de innovaciones generadas globalmente por actores diversos. Esto lleva a analizar el ritmo de difusión de estas innovaciones y los factores que lo estimulan, a objeto de visualizar su alcance.

En el gráfico 1 se presenta una adaptación de la curva de difusión de innovaciones de Rogers (1995) para analizar la evolución tecnológica de la impulsión eléctrica. Al principio la difusión es lenta debido, entre otras cosas, al desconocimiento, la incertidumbre y la prevalencia de las tecnologías del anterior paradigma (Pérez, 2002). La difusión de las innovaciones es impulsada por los propios innovadores a fin de incursionar en mercados nacientes, pero en este caso también por factores institucionales que promueven energías más limpias. En esta etapa, la difusión es restringida por limitaciones técnicas y enfrenta otros intereses corporativos (p. ej., del *lobby* petrolero) y el rechazo de los consumidores.

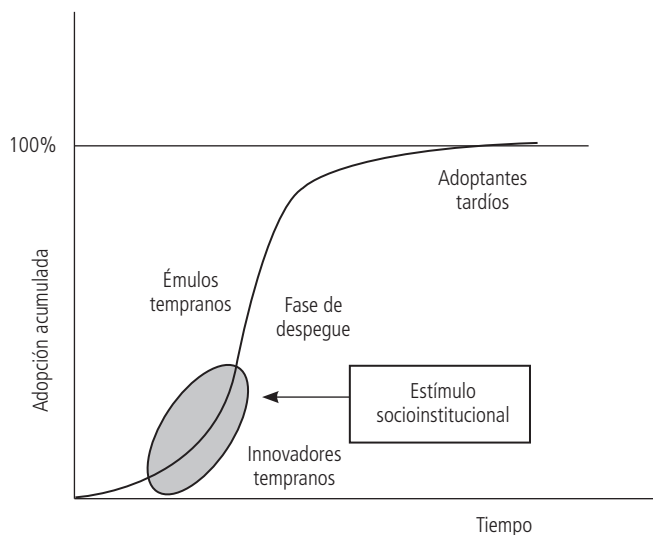
En la actualidad se está en la fase de despegue (zona sombreada del gráfico 1), ya que comienza a registrarse un aceleramiento en la generación y difusión de nuevas innovaciones. Empresas y centros de investigación (émulos tempranos), ante el auge de nuevas oportunidades, la acumulación de conocimiento y presiones provenientes del ámbito socioinstitucional, comienzan a trabajar en las diferentes áreas, multiplicando resultados de la I+D.

Surge el tercer rasgo de esta revolución tecnológica: las innovaciones se desarrollan en diversos ámbitos globales, situación que planteará una competencia mayor por el acceso a mercados y materias primas, acentuando la difusión de las innovaciones. En esta oportunidad, Asia y la Unión Europea (UE) son las regiones que hasta ahora presentan mayor dinamismo tecnológico e industrialización, mientras que Estados Unidos hace esfuerzos por no rezagarse en esta fase de despegue.⁶

⁶ La pregunta que invariablemente surge es: ¿en qué posición se encuentra América Latina dentro de esta nueva ola de innovaciones? Aunque tres países (Argentina Bolivia, Chile) poseen las casi totalidad de las reservas de la principal materia prima –litio– (96 por ciento)

Gráfico 1

Curva de difusión de innovaciones de la revolución tecnológica de impulsión eléctrica



Fuente: Rogers, 1995. Adaptación nuestra.

¿Se transformará la matriz energética?

Una revolución tecnológica trastoca los cimientos de la economía y contribuye a crear nuevas áreas de producción y servicios. En esta perspectiva, ¿pueden esperarse modificaciones radicales en los medios de transporte? En la etapa actual no. Al menos en el corto plazo seguirán siendo similares a los actuales –vehículos individuales de pasajeros y de carga–, transitando por las mismas o similares arterias viales. Sin embargo, se modificarán radicalmente los sistemas de impulsión, proceso que tendrá repercusiones en la matriz energética.

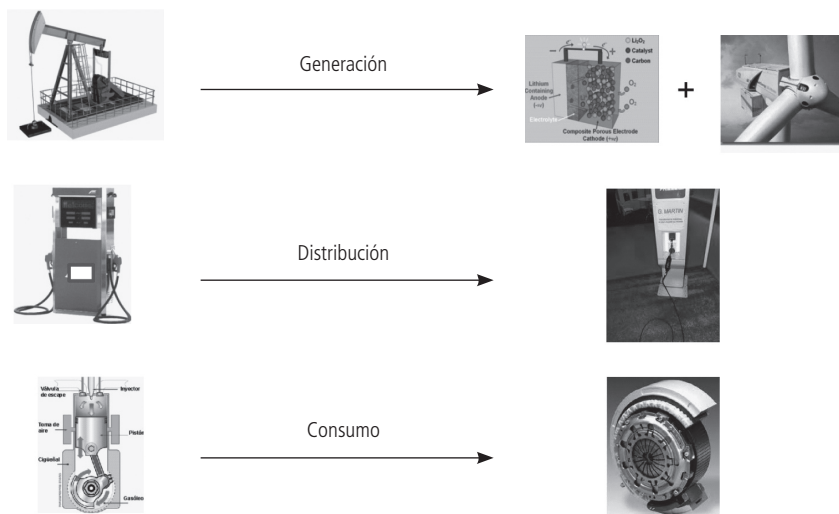
Un objetivo de producir vehículos eléctricos es disminuir emisiones. Es de esperarse que este factor influya en el desarrollo de fuentes más limpias que sustituyan parcialmente combustibles fósiles por una combinación de fuentes energéticas fijas y móviles (p. ej., fuente eólica-baterías de litio). En segundo lugar, diversificará la estructura de distribución de combustible, entre otras razones por mejoras en la seguridad de los trabajadores y usuarios.

(Bruckman, 2013), suficiente para un desarrollo de los sistemas tecnológicos de baterías a muy largo plazo, sus capacidades de I+D+i en las áreas de conocimiento clave son escasas, por lo que, si no se adoptan políticas de ciencia, tecnología e innovación adecuadas, ingresarán en la fase de adoptantes tardíos.

Finalmente, modificará la estructura de consumo mediante la sustitución progresiva de los motores de combustión interna por motores eléctricos (figura 1).

Figura 1

Cambios en la matriz energética



La modificación de la red de energía se adelanta en diversos países. Una iniciativa importante es *Green eMotion*, lanzada en 2011 por la Comisión Europea para facilitar la introducción de la impulsión eléctrica en Europa. En este programa participan fabricantes de automóviles, servicios públicos, municipios, universidades y centros tecnológicos. Aparte de estimular la I+D, establecerá normas para estandarizar los procesos de carga en los diferentes países a fin de facilitar su acceso y desarrolla más de 10.000 puntos de recarga en diferentes regiones del continente.

En Japón, las empresas Toyota, Nissan, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries y la Tokyo Electric Power Company conformaron la Asociación Charge de Move o «CHAdEMO Association»⁷ con el objeto de incrementar el número de estaciones de carga rápida en todo el mundo y avanzar en la estandarización de los procesos de carga. En Estados Unidos, país que posee un potencial de generación eólica que supera en más de cuatro veces la disponibilidad energética de las demás fuentes de energía sumadas, se estima que combinando la generación eólica

⁷ Cfr. <http://www.chademo.com/sp/index.html>.

con vehículos híbridos, sin hacer mayores modificaciones de la red de energía, se reduciría en un 21 por ciento el uso de combustibles fósiles (Kamada y Mikelsen, 2011).

Los avances en las tecnologías de generación y almacenamiento de electricidad harán que en el mediano plazo aumente la participación de estas fuentes en la generación total de energía, estimuladas por la creciente demanda de la impulsión eléctrica. Pérez (2002) señala que las nuevas tecnologías no pueden prosperar en el ambiente del paradigma precedente, por lo que se producen desacoplamientos en la esfera tecnoeconómica. Esto es evidente en las industrias energéticas, donde nuevas áreas de producción y servicios desplazarán progresivamente a las antiguas y muy contaminantes basadas en fuentes fósiles (figura 1). Pero a diferencia de lo anotado por la autora con relación al poder que tiene este proceso de transformar el marco socioinstitucional, cuya forma es dada por el viejo paradigma, nosotros consideramos que será el marco institucional de la sustentabilidad el que inducirá las transformaciones sociotécnicas.

La presión ambiental global define factores institucionales

Las emisiones de CO₂ superaron en cerca del 5 por ciento las 32 gigatoneladas anuales, nivel que, estiman los expertos, es el máximo que haría todavía manejable la situación climática. Aun así, modelos climáticos indican que esta cantidad generará un aumento de 2 grados centígrados en la temperatura del planeta (IEA, 2011). Esta cifra preocupa, ya que para evitar los efectos más perjudiciales del calentamiento global debería disminuirse drásticamente el crecimiento de estas emisiones, pero, por el contrario, se estima un alto crecimiento de la demanda mundial de energía (27 por ciento hasta el 2030) —sobre todo en países fuera de la OCDE—, la cual, de mantenerse las trayectorias tecnológicas basadas fundamentalmente en combustibles fósiles, pasará de 37,3 millones de barriles en 2010 a 59,6 millones de barriles diarios en 2030 (Purvin y Gertz, 2012). Esto resultaría en un aumento de las emisiones de CO₂ de aproximadamente 7 gigatoneladas (30 por ciento por encima del límite crítico para que el incremento de la temperatura de la Tierra sea de 2°C).

Este escenario presionará por la modificación de la matriz energética. Es insensato continuar dentro de trayectorias tecnológicas basadas en energías fósiles cuya producción, distribución y consumo tienen elevados costos ambientales, más aún si se mantiene inmodificable el imperativo del crecimiento continuo como noción de desarrollo. De esta forma, la legislación emerge como herramienta para aminorar las emisiones de GEI y a la vez puede incidir de manera importante en la tecnología, estimulando el desarrollo de opciones más eficientes y limpias de generación, distribución y uso de la energía.

Las políticas regulatorias en materia ambiental indujeron el desarrollo de tecnologías para el aminoramiento del impacto ambiental de las actividades industriales (Geffen, 1995). Ante el imperativo de disminuir el impacto ambiental global, es necesario modificar los

sistemas tecnológicos, por lo que debe plantearse que los acuerdos internacionales y las políticas nacionales y supranacionales promuevan las transformaciones sociotécnicas que permitan disminuir el crecimiento de las emisiones de GEI.

Marco institucional de legislación

Se analizó en primer lugar el ámbito de los acuerdos internacionales. En el caso de las emisiones causantes del efecto invernadero, el primer hito fue la suscripción del protocolo de Kyoto en 1997, el cual estableció el compromiso de los países de no exceder las cantidades de emisiones fijadas y el compromiso de los países desarrollados de reducir el total de sus emisiones en no menos del 5 por ciento respecto de los valores de 1990, durante el período 2008-2012. El cumplimiento de este acuerdo fue prácticamente nulo.

En la XV Conferencia sobre el Cambio Climático realizada en 2009, se reconoció el bajo acatamiento del Protocolo de Kyoto y se firmó el Entendimiento de Copenhague, acordándose un objetivo total de reducción de emisiones. Dos años más tarde, en la Cumbre del Clima de Durban (2011), justo a un año de expirar se prorrogó el Protocolo de Kyoto hasta 2015, restableciéndose metas de disminución de emisiones de GEI para 2020. Finalmente, en la Cumbre sobre Cambio Climático de Varsovia (2013) se firmó un acuerdo de principios que permitirá trabajar en los informes para la Cumbre de París de 2015, donde debe suscribirse un *acuerdo vinculante*⁸ para limitar el calentamiento global a 2° C a partir de 2020 (Naciones Unidas, 2013). Es decir, que el nivel de emisiones no deberá sobrepasar las 32 gigatoneladas anuales.

La movilización internacional en torno al problema es intensa. Sin embargo, hasta ahora los resultados en términos de los objetivos son exiguos, debido en gran medida a presiones de importantes sectores de la economía. Pero destaca la permanencia del tema en la opinión pública y la realización de continuas investigaciones que presentan, cada vez con mayor precisión, la continua degradación del ambiente. Esto ha incidido para que en ámbitos supranacionales y nacionales se establezcan acuerdos y se dicten legislaciones para disminuir las emisiones de GEI. En 2007, la UE presentó un programa sobre energía y cambio climático cuya meta es reducir las emisiones en un 20 por ciento con respecto a los niveles de 1990, incrementar la participación de las energías renovables en un 20 por ciento y mejorar la eficiencia energética en igual porcentaje. Para el transporte automotor, el porcentaje de reducción acordado es del 19 por ciento (UE, 2009). Por su parte, en Estados Unidos el Congreso aprobó en 2009 la ley de seguridad y energías limpias, que establece la progresiva reducción de GEI. En 2012, deberá ser un 3 por ciento menor respecto al año 2005, en 2020 un 17 por ciento y en 2050 un 83 por ciento (US Government Printer Office, 2009).

⁸ En otras palabras de obligatorio cumplimiento.

La legislación incentiva transformaciones de los sistemas tecnológicos

El cumplimiento de los acuerdos y de la legislación requerirá de la adopción combinada de políticas regulatorias y de estímulo que determinarán las posibilidades de avanzar en el paradigma de la impulsión eléctrica. Algunas se presentan a continuación.

En 2011, el Gobierno de Estados Unidos estableció en sus estándares de ahorro promedio de combustible corporativo (Corporate Average Fuel Economy, CAFE) que para 2025 los fabricantes de vehículos deberán duplicar el rendimiento promedio de los automóviles y camiones producidos en ese país, pasando de 45,7 km por galón de combustible (3,785 lt) a 91,3 km (Bastani y otros, 2012). Aun cuando se introducen múltiples innovaciones, la eficiencia de los motores de combustión interna más modernos no supera el 15-20 por ciento, siendo poco probable cumplir esa meta con esta tecnología. Esta regulación incentivará el desarrollo y la producción de autos eléctricos e híbridos.

Una orientación prioritaria del actual Gobierno de los Estados Unidos en materia energética ha sido reducir la dependencia del petróleo importado, para lo cual, entre otras cosas, ha creado incentivos al desarrollo de vehículos eléctricos. En el informe sobre el Estado de la Unión de 2011, se solicitó «poner un millón de vehículos eléctricos en las carreteras de este país para el año 2015, a fin de promover un sistema de transporte sustentable cuya conformación crearía empleos de calidad y crecimiento económico» (Department of Energy, 2011; traducción nuestra).

Esta solicitud se soporta en políticas federales para fortalecer la capacidad tecnológica e industrial. En 2008, se estableció una alianza entre el Argonne National Laboratory de la Universidad de Chicago y catorce compañías fabricantes de baterías y materiales avanzados, a fin de desarrollar infraestructura industrial para la fabricación de baterías de litio con fondos gubernamentales de 2.000 millones de dólares (Green Car Congress, 2008). Apoyándose en la ley de recuperación de 2009, se invierte en desarrollar capacidad de manufactura en tecnologías de impulsión eléctrica, incluyendo 2.000 millones de dólares en subsidios a fabricantes de baterías, motores y otros componentes de vehículos eléctricos, y 2.400 millones de dólares en préstamos a fábricas de estos. Por otra parte, se diseñan programas de demostración de vehículos eléctricos que incluyen fabricar unidades y la instalación de más de 22.000 estaciones de carga en diferentes ciudades de ese país (Department of Energy, 2011). En Europa, Dinamarca e Irlanda han realizado avances en la introducción de vehículos eléctricos y la modificación de la red energética, pero también se desarrollan importantes iniciativas comunitarias como el citado proyecto *Intelligent Dynamics for Fully Electric Vehicles* (ID4EV) y el programa *Green eMotion*, orientado a la introducción masiva de la impulsión eléctrica en Europa.

Cambios en la estructura industrial

Otro elemento que sugiere la transformación de los sistemas tecnológicos son los intensos movimientos en la industria. Las multinacionales de automóviles y baterías vienen incrementando sus inversiones en esta área, tanto en I+D como en proyectos industriales, bien sea mediante esfuerzo propio o en alianzas con otras multinacionales, e incluso, como se vio, con el Estado. Se conforman *joint ventures* entre grandes empresas europeas y asiáticas. Citando algunos ejemplos, en 2.008 Robert Bosch GMBH (Alemania) y Samsung SDI (Corea del Sur) crearon la sociedad SB Limotive, con el objetivo de liderar el mercado mundial de baterías de litio para automóviles. Y la empresa automovilística BMW (Alemania) adquiere de SB Limotive baterías de litio para sus vehículos eléctricos.

Las automotrices japonesas están instalando plantas de baterías de litio en diferentes continentes. En 2012, Nissan inauguró en Europa tres plantas de baterías que emplearán los vehículos que desarrolla en alianza con Renault, en tanto que Mitsubishi Motors y Fuji Heavy Industries Ltd comenzaron en 2009 la producción en masa de vehículos eléctricos equipados con baterías de ión-litio.⁹ La empresa BYD de China desarrolla una nueva generación de vehículos para comercializarlos en Occidente.

Tesla emerge como la firma estadounidense más importante de esta industria. Considerada por algunos más que una empresa de automóviles, una empresa de alta tecnología, comienza a trastocar la organización industrial. En 2012 vendió 2.650 automóviles, cifra que se incrementa significativamente en 2013, cuando alcanzó las 21.000 unidades. Parte importante de los lucros de Tesla durante ese año provinieron de la venta de bonos de vehículos de cero emisiones (bonos de carbono). Durante el primer trimestre de ese año, recibió por este concepto 68 millones de dólares, estimándose que para el ejercicio completo alcanzará los 250 millones de dólares (IER, 2013).

Un hecho revelador de la importancia que ha adquirido esta tecnología y de su potencialidad económica es que, aun cuando las ventas de esta empresa en Estados Unidos constituyen apenas el 1 por ciento de las de Ford Motors, su cotización en el mercado de capitales se aproxima ya a un tercio de la de esta última.¹⁰

Es evidente que comienza a surgir un visible conjunto de tecnologías, productos e industrias nuevas y dinámicas, bajo esquemas no tradicionales de organización industrial, que impactarán en la economía y podrán impulsar una oleada de desarrollo a largo plazo; rasgo que confirma la transformación profunda de los sistemas tecnológicos que puede promover una revolución tecnológica (Pérez, 2002).

⁹ Cfr. <http://www.bateriasdelitio.es/2>.

¹⁰ Cfr. <http://www.businessweek.com/articles/2013-08-27/tesla-is-now-worth-20-billion>.

Conclusiones

Los crecientes impactos negativos de muchas actividades antrópicas sobre el ambiente llevan a cuestionar muchos de los sistemas tecnológicos imperantes. A pesar de haber transcurrido más de tres décadas del inicio de la revolución tecnológica microelectrónica, que conllevaba un menor uso de materia y energía, el consumo de recursos y la contaminación no paran de crecer. Uno de los problemas derivados más acuciantes es el de las emisiones de GEI que contribuyen al calentamiento global.

Ante esta situación se suscriben acuerdos, cuyo cumplimiento hasta ahora es muy bajo, incluso por parte de algunos de los países que tienen la mayor cuota de responsabilidad en el problema y que, paradójicamente, poseen la mayor capacidad técnica y científica para afrontarlo. Se impone, entonces, una transformación en los sistemas tecnológicos de la producción y los servicios. En el caso específico del transporte, sector que tiene gran responsabilidad en la generación global de GEI, es imperativo una disminución drástica de estas emisiones, algo poco probable si se mantienen las trayectorias tecnológicas del paradigma de la combustión interna.

Este imperativo ambiental impulsa un vigoroso incremento de la investigación en áreas vinculadas al almacenamiento y provisión de energías. Algunas de ellas incluyen líneas (*research fronts*) que en la actualidad se ubican entre las más importantes en el ámbito mundial. Avances en electroquímica, apoyados en la nanotecnología, especialmente en litio, han aumentado las posibilidades de producir baterías capaces de almacenar mayor cantidad de energía y potencia, en tanto que el desarrollo de nuevos materiales de grafeno permitirá elaborar componentes de las baterías mucho más eficientes, la fabricación de dispositivos de almacenamiento y recuperación de energía y piezas estructurales de los vehículos. Todo ello abre grandes oportunidades de desarrollo tecnológico.

Paralelamente, se acelera el ritmo de innovación. En la última década se ha incrementado de manera importante la densidad de carga de las baterías, permitiendo una mayor acumulación de energía que se traduce en mayor autonomía, hasta ahora una de las grandes desventajas que ha presentado la impulsión eléctrica, y un aumento sustancial de la potencia. El resultado en términos de mercado es la progresiva introducción de vehículos eléctricos, con alto potencial de crecimiento en los próximos años.

Estos cambios están generando una transformación de varios sistemas tecnológicos que por su magnitud adquieren carácter disruptivo. Su impacto sociotécnico puede promover incluso una revolución tecnológica. Por su cantidad y carácter (mayores), las innovaciones no solo tienen la capacidad de modificar los sistemas tecnológicos de la locomoción, sino también de introducir cambios en la matriz energética, tanto en la generación como en la distribución y uso de la energía. Se han presentado evidencias del surgimiento de nuevas tecnologías, con ventajas inobjetables respecto de las anteriores, sobre todo en términos de

ahorro energético y disminución del impacto ambiental, y de nuevas industrias y cambios significativos en diversos servicios que impactarán la estructura económica.

Los rasgos fundamentales que tendría esta revolución tecnológica son:

1. La movilidad, derivada de la miniaturización de los dispositivos y las baterías, que modifica actividades que anteriormente estaban atadas a fuentes fijas de energía y que incluso puede modificar hábitos de los individuos.

2. Ser impulsada por factores socioinstitucionales que responden a imperativos ambientales, por lo que está indisolublemente asociada a los imperativos del desarrollo sustentable.

3. Su advenimiento y desarrollo se registra en diversos ámbitos globales con participación de amplio número de actores científicos y productivos.

Su particularidad es que surge de la necesidad de transformar la estructura sociotécnica a objeto de disminuir el impacto ambiental global. En este sentido, políticas regulatorias y de estímulo al desarrollo tecnológico serán clave en la introducción de innovaciones tecnológicas radicales y cambios en la estructura de producción de energía y los servicios, imperativos para aminorar el deterioro ambiental y permitir nada menos que la continuidad de la vida de los seres humanos en el planeta.

Referencias bibliográficas

Bastani, P., J.B. Heywood y C. Hope (2012). *U.S. CAFE Standards: Potential for Meeting Light-duty Vehicle Fuel Economy Targets, 2016-2025*, MIT Energy Initiative, Cambridge, Massachusetts.

Bruckmann, M. (2013). «Las reservas de recursos naturales son una fortaleza de Suramérica», entrevista, *América Latina en Movimiento*, <http://alainet.org/active/64056&lang=es>.

Cambridge Econometrics y Ricardo-AEA (2013). *An Economic Assessment of Low Carbon Vehicles*, www.ricardo-aea.com/cms/assets/MediaRelease/Economic-Assessment-Vehicles-FINAL2.pdf.

Canis, B. (2011). *Battery Manufacturing for Hybrid and Electric Vehicles: Policy Issues*, Congressional Research Service, Washington D.C.

Christensen, J., P. Albertus, R. Sánchez-Carrera, T. Lohmann, B. Kozinsky, R. Liedtke, J. Ahmed y A. Kojic (2012). «A critical review of Li/air batteries», *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 159, n° 2, www.eosenergystorage.com/documents/2012_JES_Christensen_Kojic_Critical_Review_Li-air.pdf.

Detroit Electric (2011). *The Detroit Electric Automobile*, www.detroitelectric.org.

Energy & Capital (2012). *Special Report. China's \$2.00 Lithium Linchpin*, www.energyandcapital.com/report/chinas-200-lithium-linchpin/508.

Foladori, G. y N. Invernizzi (2009). «Las nanotecnologías en la crisis mundial», *Polis: Revista Académica de la Universidad Bolivariana*, vol. 8, pp. 281-298.

Gani, A. (s/f). «Calculation of carbon footprint of a car running in diesel, hydrogen and electricity derived from crude oil», Annapolis University, mimeo.

Geffen, C. (1995). «Radical innovation in environmental technologies: the influence of federal policy», *Science and Public Policy*, vol. 22, n° 5.

Green Car Congress (2008). *14 US Companies, Argonne Lab Form National Alliance to Advance Li-Ion Battery Manufacturing in the US*, www.greencarcongress.com/2008/12/14-us-companies.htm.

Green eMotion (2012). *Green eMotion – A Pan-European Effort towards an Interoperable Electromobility System*, www.greenemotion-project.eu/upload/pdf/about_us/GreeneMotion_Image_US.pdf.

Hadfield, L. y R. Seaton (1999). «A co-evolutionary model of change in environmental management», *Futures*, vol. 31, pp. 577-592.

Hensley, R., J. Newman y M. Rogers (2012). «Battery technology charges ahead», *McKinsey Quarterly*, julio.

Herzog, T. (2009). *World Greenhouse Gas Emissions in 2005*, World Resource Institute Working Paper, www.wri.org/publication/navigating-the-numbers.

Hughes, T. (1987). «The evolution of large technological systems», en W.E. Bijker, T.P. Hughes y T.J. Pinch, eds., *The Social Construction of Technological Systems*, Cambridge, MIT Press.

ID4EV (2010). «ID4EV project start – Intelligent dynamics for fully electric vehicles. Industry and academia search together for innovative brake and chassis systems for electric vehicles», press release, www.id4ev.eu/sites/all/ID4EV/ID4EV_press_release.pdf.

Institute for Energy Research (IER) (2013). *Tesla Motors' Specious Rise*, www.instituteforenergyresearch.org/2013/05/24/tesla-motors-specious-rise/.

International Energy Agency (IEA) (2011). *Prospect of Limiting the Global Increase in Temperature to 2°C Is Getting Bleaker*, www.iea.org/index_info.asp?id=1959.

Kamada, F. y T. Mikelsen (2011). «Editorial: Trends in wind energy», *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 3, n° 5.

King, C. y D. Pendlebury (2013). *Web of Knowledge – Research Fronts 2013: 100 Top-Ranked Specialties in the Sciences and Social Sciences*, Thomson Reuters.

Mercado, A. y K. Córdova (2005). «Desarrollo sustentable-industria: más controversias, menos respuestas», *Ambiente e Sociedade*, vol. VIII, n° 1.

MIT (2013). «Designing high-speed motors for energy storage and more», *Energy Futures*, otoño, pp. 25-29, MIT.

Naciones Unidas (2013). «UN Climate Change Conference in Warsaw keeps governments on a track towards 2015 climate agreement», press release, https://unfccc.int/files/press/news_room/press_releases_and_advisories/application/pdf/131123_pr_closing_cop19.pdf.

OECD-IEA (2009). *Technology Roadmap Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, www.iea.org/papers/2009/EV_PHEV_Roadmap.pdf.

Olivier, J., J. Greet y P. Jeroen (2012). *Trends in Global CO₂ Emissions – 2012 Report*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Pérez, C. (2002). *Revoluciones tecnológicas y capital financiero*, México, Siglo XXI.

Pérez, C. (2010). «Technological revolutions and techno-economic paradigms», *Cambridge Journal of Economics*, vol. 34, n° 1, pp. 185-202.

Peters, G., G. Marland, C. Le Quéré, T. Boden, J. Canadell y M. Raupach (2012). «Rapid Growth in CO₂ emissions after 2008-2009 global financial crisis», *Nature Climate Change*, vol. 2, n° 1, pp. 2-4.

Purvin & Gertz (2012). *Global Petroleum Market Outlook – Balances 26 April 2012*, www.purvingertz.com/dynpage.cfm?PageID=11&filter=2&Article=194.

Rogers, E. (1995). *Diffusion of Innovations*, Free Press.

Romero, F. (2009). «A brief story of electric cars», *Time*, www.time.com/time/business/article/0,8599,1871282,00.html.

ScienceDaily (2011). *New Method to Make Sodium Ion-Based Battery Cells Could Lead to Better, Cheaper Batteries for the Electrical Grid*, www.sciencedaily.com/releases/2011/06/110607121139.htm.

Scrosati, B. y J. Garche (2010). «Lithium batteries: Status, prospects and future», *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 2419-2430.

Singh, T. (2012). *Envia Systems Announces New World Record for Lithium-Ion Battery Energy Density*, <http://inhabitat.com/envia-systems-announces-new-world-record-for-lithium-ion-battery>. 2012.

The International Council on Clean Transportation (2013). *Electric Vehicle Grid Integration in the U.S., Europe, and China Challenges and Choices for Electricity and Transportation Policy*, www.theicct.org/sites/default/files/publications/EVpolicies_final_July11.pdf.

Unión Europea (2009). *La UE y la seguridad energética. Suministro energético fiable en la transición a una economía de bajas emisiones de carbono*, EU Focus.

US Department of Energy (2011). *One Million Electric Vehicles by 2015*, www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/1_million_electric_vehicles_rpt.pdf.

US Government Printer Office (2009). *American Clean Energy and Security Act of 2009*, www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-111hr2454pcs/pdf/BILLS-111hr2454pcs.pdf.

Yin, D. e Y. Hori (2009). «A novel traction control without chassis velocity for electric vehicles». Ponencia presentada en el EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Noruega, 13-16 de mayo, http://hori.k.u-tokyo.ac.jp/paper_2011/old-papers/yin/EVS_24_2170087.pdf.