

La Re-evolución de la energía

Pedro Gómez Romero

Profesor de Investigación del CSIC en el Centro de Investigación en Nanociencia y
Nanotecnología (CSIC-ICN), Bellaterra, Barcelona

Capítulo 8 del Libro “EL SECTOR ENERGÉTICO ANTE UN NUEVO ESCENARIO”

(Editores, José Luis García Delgado y Juan Carlos Jiménez)

Comisión Nacional de la Energía / CIVITAS / Thomson Reuters

ISBN: 9788447034284

Paginas 159-188

2010

Resumen.

Con el petróleo barato en vías de extinción y el abundante carbón amenazando clima y medio ambiente, nuestro modelo energético está abocado a un cambio. Pero cada año quemamos más combustibles fósiles. Vivimos ya el principio de un complejo problema trenzado entre energía y medio ambiente, un problema que no desaparecerá milagrosamente por la chimenea. Pero cada año consumimos más energía.

Nuestra sociedad de primer mundo y tres cuartos no parece alarmada por la situación, quizá anestesiada por el reinado de lo prescindible. Suponemos que cuando llegue el momento, el mercado, apoyado por la ciencia y la tecnología, nos dará la solución a nuestros problemas. Pero el momento es ya.

Este capítulo presenta algunas de las más importantes revoluciones científicas pendientes, cuya materialización hará posible la necesaria, y ya urgente, re-evolución tecnológica hacia un modelo sostenible de generación y consumo de energía. Agrupadas en cuatro grandes áreas (combustibles limpios, fuentes primarias renovables, almacenamiento de energía y ahorro y eficiencia energéticos) las muchas revoluciones pendientes van desde el silicio solar (u otros materiales alternativos) baratos y eficientes, hasta biocombustibles de segunda generación, LEDs blancos o supercondensadores electroquímicos.

En este capítulo se discute lo que la ciencia y la tecnología pueden hacer para ayudar a resolver nuestro rompecabezas energético, pero también las barreras sociales que dificultan nuestra evolución tecnológica.

Ahora que el petróleo está barato debemos aprovechar la energía que nos brinda para asegurar el futuro energético de las nuevas generaciones. Necesitamos energía...

... y tiempo.

No es el lenguaje, tampoco el uso de herramientas, ni el hecho de ser una especie social, ni nuestra capacidad de construir grandiosas arquitecturas. Lo que más nítidamente nos diferencia del resto de especies animales es nuestra capacidad de usar energía externa a nuestro propio metabolismo biológico para alimentar funciones sociales. Esta energía, conocida como exosomática, es verdaderamente uno de nuestros rasgos diferenciadores más notorios para cualquier observador imparcial de nuestro mundo. Y se trata además de un rasgo que afecta intensamente la relación entre nuestra especie y el entorno en el que ha evolucionado.

De la misma forma que una célula o un organismo usan energía para mantener su estructura ordenada y funcionando, es decir, para mantenerse vivos, las sociedades humanas usan energía exosomática (además de la energía somática que alimenta sus cuerpos individuales) para mantener dichas sociedades estructuradas y funcionando.

¿Cómo se compara esa energía exosomática con la energía somática que alimenta nuestro metabolismo biológico? ¿Cuánto gastamos por persona y día en mantener nuestro cuerpo vivo y en mantener viva nuestra sociedad? La respuesta depende de factores como el tipo de sociedad en el que vivimos. Para darnos una idea aproximada de la respuesta a esas preguntas podemos analizar el siguiente gráfico.

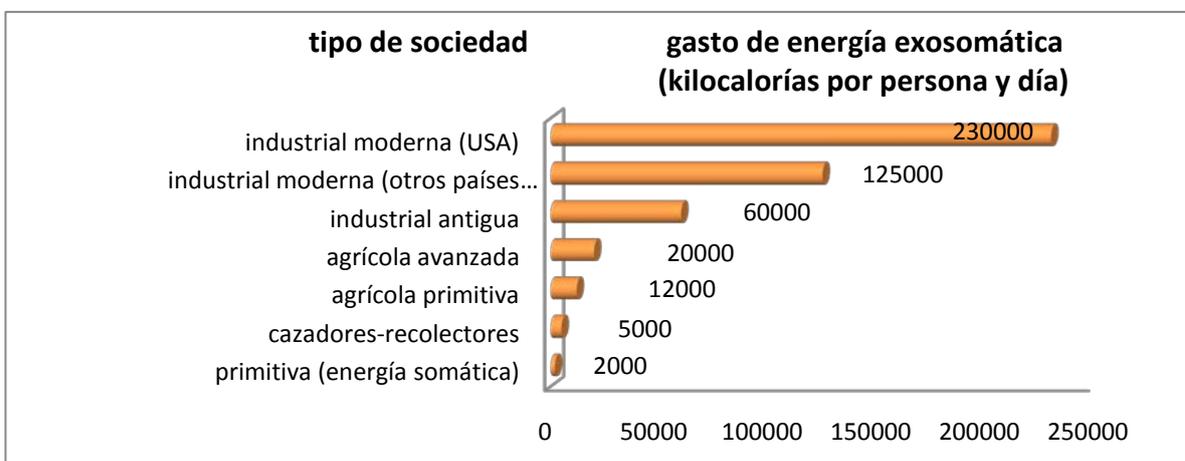


Figura 1. Consumo de energía exosomática en kilocalorías por persona y día en función del tipo de sociedad (Fuente: G. T. Miller Jr. "Living in the Environment" 11th Ed. Brooks/Cole, 2000)

Dos mil kilocalorías por persona y día es aproximadamente la energía de una dieta humana promedio y nos servirá de punto de comparación con el gasto de energía exosomática por persona y día, un gasto que aumenta a medida que una sociedad se hace más compleja e incluye más y más complejas funciones sociales.

En nuestra evolución como especie energética podemos apreciar dos grandes saltos cualitativos. El primero se da con la Revolución Industrial en los siglos XVIII y XIX, cuando un tal James Watt mejora una máquina de vapor que había diseñado un tal Newcomen que a su vez se había basado en una idea de un tal Savery, todos en el Reino Unido. Con la Revolución Industrial, asociada al carbón, el ferrocarril y el Reino Unido, el fuego pasó de ser el calor del hogar humano a ser la energía de la industria y el transporte humanos. El segundo salto cualitativo se da con el advenimiento de la sociedad de consumo moderna, impulsada por la fabricación masiva en cadena. Es de hecho este cambio, asociado a la democratización del consumo en el Primer Mundo, el que disparó nuestro consumo de energía. El modelo Ford T con su producción en cadena, las perforaciones petroleras masivas, la revolución verde y sus pesticidas, los cartones de paquetes de cigarrillos perfectamente liados, o la microelectrónica megadistribuida han sido la causa del segundo salto cualitativo en consumo energético (y de materias primas) de la humanidad, así como fuente de problemas medioambientales y de salud.

Si la revolución industrial fue impulsada por el carbón, el ferrocarril y el Reino Unido en el Siglo XIX, nuestra moderna sociedad de consumo está asociada al petróleo, el coche y a Estados Unidos en el Siglo XX. Precisamente por eso la gráfica de la Figura 1 nos revela la marcada diferencia entre el consumo energético por persona y día en los Estados Unidos en comparación con otros países desarrollados. Tirar cubiertos platos y vasos después de cada comida puede ser bueno para el PIB pero es muy caro desde el punto de vista de la energía (y también de los residuos).

Los combustibles que han alimentado nuestro metabolismo social han evolucionado con los siglos. Madera, carbón, petróleo, gas natural componen una serie de creciente eficiencia energética y menores emisiones de CO₂ por unidad de energía producida. Pero no debemos olvidar que todos estos combustibles son en realidad Sol en conserva, procedente de helechos gigantes el carbón o de microorganismos marinos el petróleo y el gas natural, pero Sol almacenado hace muchos millones de años en todo caso.

Gas natural, petróleo y carbón constituyen un capital de mayor valor que precio. Que estos fósiles combustibles se hayan convertido en combustibles fósiles tiene mucho que ver con nuestro primario modelo lineal de producción y consumo. Pensar que nos podíamos permitir quemarlos por lo que nos costara su extracción y transporte hizo que

hayamos vivido un siglo con un espejismo de energía barata que nos ha hecho adictos a los combustibles fósiles y al petróleo en particular.

Efectivamente, nuestra dependencia de los combustibles fósiles es abrumadora. A finales del siglo XX y principios del XXI carbón petróleo y gas natural sumaban aproximadamente un 80% de la energía primaria consumida a nivel global y la producción de electricidad procedía en sus dos terceras partes de la quema de combustibles fósiles en centrales térmicas de mayor o menor eficiencia (Figura 2).

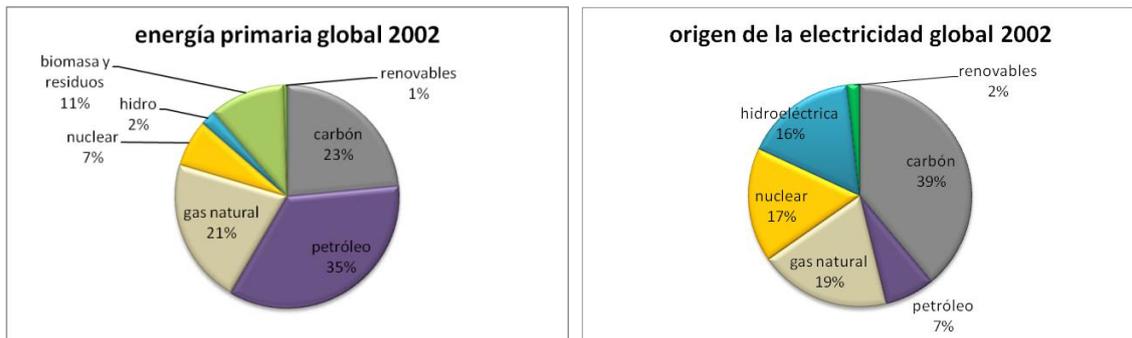


Figura 2. Izquierda: Suministro de energía primaria a nivel global (año 2002). Distribución por fuentes en porcentaje. Derecha: Generación de electricidad. (Fuente: International Energy Agency, Key World Energy Statistics, 2004)

La contribución de fuentes renovables a este combinado energético merece un cierto análisis. Sumando las contribuciones de energías eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, etc. no llega ni al 1% de la energía primaria que el redondeo ha asignado generosamente a “renovables” en la figura 2. Añadir la energía hidráulica sólo supone un 2% más. La mayor parte (en torno a un 11% del total) del consumo energético que podríamos calificar como “sostenible” procede del consumo de biomasa y residuos combustibles, lamentablemente más asociados al subdesarrollo del Tercer Mundo que a la implementación del reciclaje y el aprovechamiento de residuos en los países desarrollados.

La involuntaria contribución de los países subdesarrollados a la sostenibilidad de nuestro mundo desaparece al considerar la energía eléctrica. Por una parte vemos que los combustibles fósiles siguen siendo la fuente primaria de la electricidad mundial, con aproximadamente dos tercios del total producidos en centrales térmicas alimentadas por carbón, gas natural o petróleo.

Sin duda el consumo de energía contribuye a nuestro bienestar. La figura 3 nos muestra la dramática correlación entre el consumo de electricidad y la calidad de vida. Pero también muestra claramente que dicha correlación no es lineal y que se puede alcanzar un alto grado de bienestar social con un consumo moderado de energía. A pesar de que en esta gráfica España ocupa una posición óptima, cabría hacer un ejercicio de análisis crítico y discutir si nuestra situación se debe a una arraigada cultura de ahorro y eficiencia energéticas o bien, quizá, a una incorporación tardía e incompleta a lo que se conoció como el “estado de bienestar”

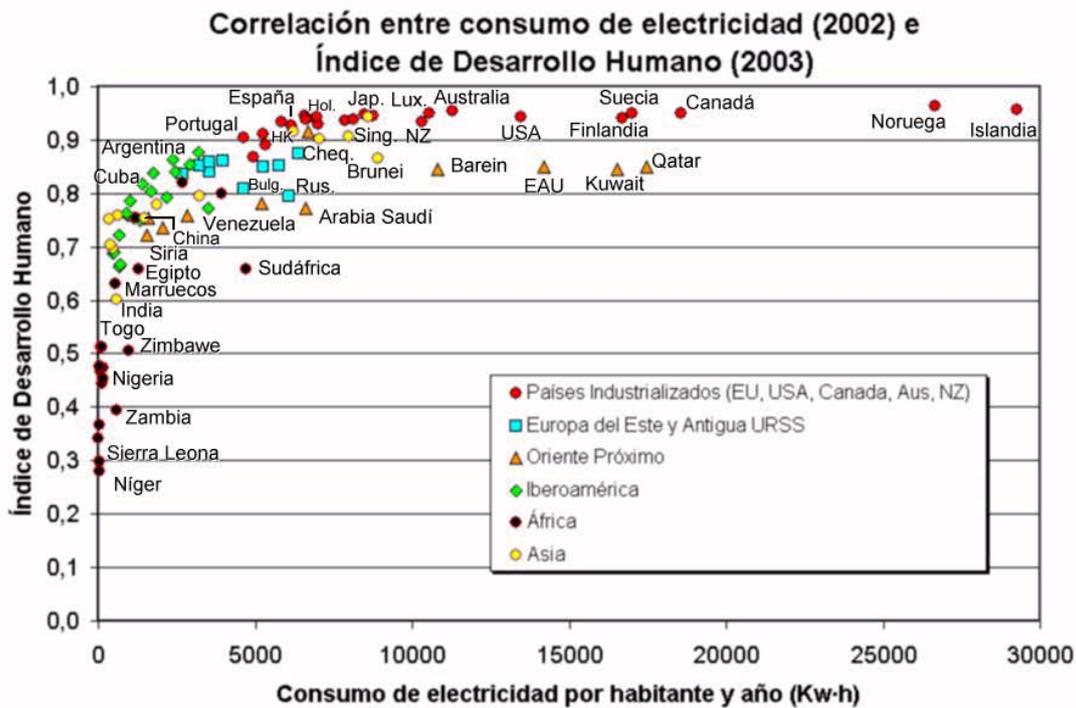


Figura 3. Índice de desarrollo Humano (IDH) frente a consumo de electricidad para un total de 98 países). El IDH es un índice empleado por la ONU que además de factores económicos considera factores sociales como alfabetización, mortalidad infantil etc. y supone una medida de la calidad de vida. (Referencia: Pedro Gómez Romero. “Un planeta en busca de energía” (Síntesis, 2007). Fuente: Human Development Report, 2005. U.N. Development Program)

Cada año nuestra especie favorita gasta más energía, y ésta es una tendencia que se mantendrá en el futuro. Según todos los expertos el consumo de energía global seguirá creciendo alimentado por las crecientes necesidades de potencias emergentes como China e India. Las previsiones son que de los 13.5 TW de potencia consumidos a nivel global en 2001, pasemos a un consumo cercano a los 28 TW hacia el año 2050 (Lewis, 2006). Eso será, por supuesto, si contamos con la fuente de energía que lo haga posible, porque los combustibles fósiles en los que hemos basado nuestro desarrollo

hasta ahora son recursos no renovables, y no van a estar ahí, en el año 2050 como han estado en el 2000. Y no será necesario que se agoten para que nos den problemas.

El petróleo será el primero en mostrar su carestía, mucho antes de haberse agotado, por supuesto. Sea en forma de un clásico máximo del tipo “peak oil” como el predicho por el geólogo King Hubert en los años 50 para Estados Unidos (y confirmado por la Historia) o sea en forma de un estancamiento mesetario durante algunos años de tipo “plateau oil” como auguran un número creciente de expertos, nadie pone en duda que la producción del oro negro que ha movido literalmente nuestra sociedad de Primer Mundo en el siglo XX tocará techo y después decrecerá. En lo que no parece haber acuerdo es en cuándo llegaremos a esa situación (si es que no hemos llegado ya).

La escuela de seguidores de Hubbert sostiene que ese máximo de producción es inminente, mientras que organismos como la IEA (International Energy Agency) lo posponen en sus predicciones en torno a 2035. La Figura 4 reúne dos gráficas con los datos históricos de los últimos cuarenta años de producción y consumo de petróleo.

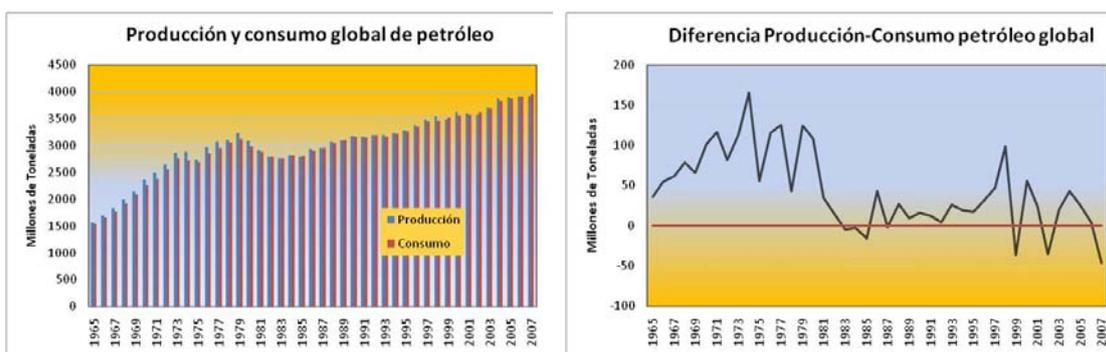


Figura 4. Datos históricos (desde 1965) de producción y consumo globales de petróleo (izquierda) y la diferencia entre ambos (derecha)

Independientemente de quien acabe teniendo razón la cuestión más importante a mi juicio es darse cuenta de que, en todo caso, es ahora cuando deberíamos hacer todo tipo de esfuerzos para asegurarnos la energía del futuro. Ahora que el petróleo está barato, que no llegó ni a los 150\$/barril, ahora que, independientemente de su precio hemos seguido y seguimos malgastándolo como hemos hecho durante todo el siglo XX; ahora es el momento de emplear la energía que nos brinda en buscar fuentes primarias y vectores energéticos que lo puedan acabar sustituyendo a medio plazo.

Esta re-evolución energética es ineludible, de una magnitud titánica (quizá tenga que volver Prometeo a desafiar a los dioses y traernos a los humanos algo mejor que el fuego o que la energía de fisión nuclear) y además empieza a ser urgente, porque los cambios tecnológicos no se improvisan ni son cuestión de un día.

Lo que sí que puede ser cuestión de un día es el descubrimiento científico. A menudo tarda más, pero, en ocasiones, un descubrimiento revolucionario se hace en un afortunado día (o mes, o año, que para el caso es lo mismo) en el que nuestra comprensión de un fenómeno cambia de repente, o en el que un problema deja de serlo. Para hacer posible y viable la necesaria re-evolución energética mencionada más arriba van a ser necesarias no una sino, probablemente, varias revoluciones científicas. Este artículo pretende, además de una visión global del problema de la energía, un breve análisis de las áreas en las que tenemos revoluciones científicas pendientes para contribuir a resolver dicho problema. En este sentido debemos señalar una verdad incómoda (¡otra!) y es que, ahora mismo, a corto plazo, no contamos con una alternativa a nuestro obsoleto modelo de extracción y consumo de combustibles fósiles. No tenemos una bala de plata que pueda acabar de un certero disparo con nuestro problema. Podríamos considerar, no obstante, que contamos con un “perdigonazo de plata”, es decir con la posibilidad de afrontar el problema con múltiples tecnologías energéticas en paralelo, tanto de generación primaria como vectores energéticos que sumados puedan dar la talla de nuestro desmesurado consumo XXL.

La lista de desarrollos específicos en los planes estratégicos de centros de I+D en todo el mundo sería interminable. Y probablemente cada responsable político o “policy maker” daría una prioridad diferente a cada una de las muchas áreas y subáreas directa o indirectamente relacionadas con la generación, el almacenamiento o la gestión energéticas. Pero, dejando a un lado los múltiples desarrollos “incrementales” en marcha, sería útil centrarnos en los aspectos verdaderamente fundamentales que tendrán que ser investigados y resueltos como condición necesaria (quién sabe si suficiente) para que determinadas tecnologías con futuro dejen de ser del futuro. Estos desarrollos revolucionarios podrían agruparse en cuatro grandes categorías, a saber:

- Combustibles más limpios
- Fuentes primarias de energía sostenibles
- Almacenamiento de energía
- Ahorro y eficiencia energéticos

Tabla 1. Listado de algunas de las revoluciones científicas pendientes en las diversas áreas relacionadas con la generación, almacenamiento o gestión de la energía. Bajo la columna “Evolución” se indica el estado del arte o las tendencias evolutivas, mientras que bajo la columna “Revolución” se apuntan los descubrimientos fundamentales necesarios para dar el impulso definitivo a cada tecnología (véase texto).

Combustibles Limpios		
Área / Tema	Evolución	Revolución
Biocombustibles (Corto plazo)	Gasificación de biomasa	Biocombustibles de 2ª Generación
Hidrógeno (almacenam.) (Medio/Largo plazo)	Hidrógeno a alta presión	Almacenamiento seguro de hidrógeno (7% en peso o mayor)
Hidrógeno (producción) (Medio/Largo plazo)	Hidrógeno por reformado	Generación masiva de hidrógeno renovable (foto- bio- catálisis)
Pilas de Combustible	Reducción cargas de Pt (nanopart)	Pilas de combustible baratas (sin Pt y funcionando a temperaturas bajas)
Fuentes primarias de energía renovable		
Área / Tema	Evolución	Revolución
Conversión fotovoltaica	Celdas de concentración	Nuevos procesos de producción de Silicio Solar (99.999%) barato
Conversión fotovoltaica		Nuevos materiales más baratos con las prestaciones del Si
Conversión fotoelectroquímica		Fotocatalizadores eficientes. Bio-producción de hidrógeno
Reducción de CO ₂	Tecnologías de secuestro de CO ₂	Reducción foto/electrocatalítica de CO ₂
Almacenamiento de energía		
Área / Tema	Evolución	Revolución
Baterías recargables	Batería de ion-litio / Litio polímero	Baterías con alta densidad de potencia y recarga rápida.
Supercondensadores	Supercondensadores Electroquímicos	Supercondensadores con alta densidad de energía
Ahorro y eficiencia energéticos		
Área / Tema	Evolución	Revolución
Iluminación eficiente	Bombillas fluorescentes / bajo Consumo	LEDs blancos brillantes y baratos
Ventanas inteligentes	Materiales foto/electrocromicos	Nuevos materiales con respuesta más rápida y bajo coste.

El orden de esas cuatro grandes áreas no implica mayor peso. Todas pueden (y deben) considerarse de importancia estratégica y se tendrán que desarrollar en paralelo. Pero, puesto que por alguna hay que empezar nuestro análisis, y dado que llenar el depósito lo hacemos por tierra, mar y aire y es un ejercicio tan cotidiano como masivo, empezaremos por los combustibles.

El 100% del transporte aéreo, el 100% del transporte marítimo y el ¿??? Del transporte terrestre a nivel mundial se basan en combustibles fósiles y más concretamente en derivados del petróleo. A pesar de esas cifras tan rotundas parecemos no ser conscientes de hasta qué punto el funcionamiento de nuestra sociedad depende de un combustible cuyo suministro no controlamos. Cuando se esgrime el anecdótico ejemplo de la energía nuclear francesa como fuente de independencia estratégica parece olvidarse el hecho de que ni los coches, ni los autobuses, ni los camiones, ni mucho menos los barcos ni los aviones franceses son eléctricos. Francia sufrirá gravemente, como cualquier otro país industrializado, una eventual carestía de petróleo, sea ésta derivada de cambios geopolíticos, de producción insuficiente para la demanda, o de cualquier otro factor.

Es por tanto primordial establecer e implementar alternativas a los combustibles derivados del petróleo, aunque los coches con emisiones de CO₂ con átomos de carbono arcaico (esperemos que cada vez menos) sigan en nuestras carreteras por muchos años.

De recolectores a agricultores de combustibles

Los biocombustibles o agrocombustibles aparecieron pronto como alternativa, aunque han ocupado sucesivamente titulares como héroes y villanos en los medios. A las grandes expectativas iniciales siguieron las grandes críticas. Los anuncios mesiánicos del principio eran infundados; respondían a las ansias públicas por escuchar que el futuro de la energía estaba resuelto; pero una especie especialista en esquilmar suelos para sobrealimentar a su primer mundo con dietas de 2000 Kcal por persona y día no puede esquilmarlos una segunda vez para alimentar su sociedad a razón de 200000 Kcal de energía exosomática por persona y día (véase Figura 1). Incluso limitándonos a la fracción de esa energía dedicada al transporte, los biocombustibles por si solos no podrían sustituir a los combustibles fósiles. Ahora bien, eso no quiere decir que los biocombustibles no tengan futuro tal y como los medios parecieron juzgar a partir de la crisis de la tortilla.

Bastó que a finales de 2006 alguien en los Estados Unidos propusiera el uso de maíz para la producción de bioetanol dedicado a la automoción para que en enero de 2007 todo el mundo en México tuviera que pagar su tortilla de maíz un 50% más cara que pocos meses antes. Fue suficiente el concurso de especuladores profesionales en un entorno de concentración mercantil para que el espejismo de una carencia de maíz y su consecuente carestía llenara las cuentas de unos pocos, mostrando de paso que el Mercado Libre tiene mucho de mercado y poco de libre, antes incluso del desprestigio definitivo del “todo vale” desencadenado por la crisis financiera de 2008. Pero para entender de verdad la crisis de la tortilla es preciso analizar otros factores no estrictamente económicos. Es muy interesante, por ejemplo, intentar analizar el problema sin ideas preconcebidas, como si tuviéramos que explicárselo a un visitante extraterrestre. En ese caso nos veríamos obligados a explicar (y caeríamos en la cuenta, de paso) que los humanos obtenemos nuestro bioetanol a partir del mismo grano de maíz que usamos para comer o para alimentar al ganado. Y no es que ésa sea la única fuente posible de biomasa del maíz. Muy al contrario, la mayor parte de la planta de maíz es materia fibrosa que consideramos desecho. ¿Por qué entonces usamos la poca materia comestible para hacer etanol para nuestros coches? Al parecer, porque no sabemos hacer otra cosa, según parece porque es lo más rentable, o lo más factible, o lo más fácil. En realidad, porque todavía no hemos descubierto cómo hacerlo bien.

¿Saben aquel que dice que lo bueno es enemigo de lo mejor? Pues el caso de la fabricación de bioetanol podría ser un buen ejemplo. La hidrólisis del almidón y la subsecuente fermentación de los azúcares obtenidos para dar etanol son procesos relativamente sencillos y bien conocidos (en particular la fermentación alcohólica hace milenios que nuestra especie la viene explotando). Por el contrario, la hidrólisis de biopolímeros como la celulosa, la hemicelulosa, o incluso peor, la lignina no la dominamos, y mucho menos a nivel industrial, a pesar de que animales como las vacas son capaces de digerir materiales celulósicos en sus estómagos. De manera que los tejidos fibrosos de plantas como el maíz constituyen para nosotros unos residuos relativamente inútiles que a menudo quemamos o, en el mejor de los casos, podemos convertir en biogás. Y sin embargo se trata de una biomasa con un gran potencial energético que haríamos bien en aprender a utilizar de forma óptima ya que, además de una fuente renovable de energía el proceso de su aprovechamiento cerraría un círculo de productividad sostenible en el que los residuos de un sector serían la materia prima de otro.

He aquí una de las revoluciones científicas pendientes. Los biocombustibles de segunda generación. Etanol producido a partir de los residuos vegetales, a partir por ejemplo de la glucosa que constituye los ladrillos elementales de la celulosa. Y a ser posible, a baja temperatura.

Efectivamente, los bloques moleculares que forman biopolímeros tan diferentes como el almidón o la celulosa son los mismos. El monómero que constituye el eslabón de ambas cadenas poliméricas es la glucosa. La diferencia entre ambas sustancias la marca no tanto su composición química como su estructura. La forma en que los eslabones monoméricos de glucosa se unen y, sobre todo, cómo las cadenas resultantes se enlazan y aglutinan entre sí para formar, mediante enlaces por puente de hidrógeno, unidades semicristalinas microfibrillas y fibras con una resistencia mecánica que las ha hecho una pieza clave en la evolución vegetal, pero que, por la misma razón, les confiere una resistencia mecánica y química que la comunidad científica no acaba de superar para dar pie a procesos eficientes y baratos de producción de bioetanol de segunda generación.

De forma similar se podría razonar con el biodiesel, aunque en ese caso el cambio de origen involucraría dejar de producirlo a partir de cultivos oleaginosos tradicionales (primera generación) para pasar a obtenerlo de aceites residuales y cultivos de algas.

Esta revolución científica pendiente resolvería algunos de nuestros problemas más acuciantes al permitir llenar el depósito de nuestros coches con un derivado de materia vegetal de desecho que además no competiría con la producción de alimentos, sino que podría tener un efecto de producción sinérgica con ellos. Otra ventaja, que al principio nos parecerá un inconveniente, es que los humanos pasaríamos de ser recolectores a ser agricultores de nuestros propios combustibles. Hace milenios dimos un paso similar con nuestros alimentos. Como sembradores y cosechadores de nuestros combustibles (o al menos de parte de ellos) seríamos más conscientes que la energía no aparece debajo de las piedras por generación espontánea, y seríamos más prudentes en su consumo. El hecho de generar combustible para nuestro transporte a partir de biomasa reciente en lugar de la biomasa arcaica en forma de carbón, petróleo o gas, nos debería hacer comprender, finalmente, que el uso de dichos combustibles debe ser sostenible y tiene sus límites.

Por otra parte, el uso de bioetanol o biodiesel en ineficientes¹ motores de combustión interna como los que han lastrado nuestros coches durante todo el siglo XX tampoco acaba de ser una muy buena idea. ¿Es que no hay nada mejor que esos motores de explosión para aprovechar eficientemente la energía potencial de un combustible? Sí que lo hay. Y además hace mucho tiempo que está inventado. Pero para que acaben siendo un elemento cotidiano de nuestro metabolismo energético, las pilas de combustible tendrán que beneficiarse no de una sino de varias revoluciones científicas tal y como analizaremos en las secciones siguientes.

Combustibles sin combustión

El mismo año de 1800 en que Alessandro Volta inventó la pila eléctrica para desacreditar la hipótesis de su colega y compatriota Luigi Galvani, los británicos Carlisle y Nicholson la usaron para descubrir serendípicamente que la electricidad era capaz de descomponer el agua en sus elementos, hidrógeno y oxígeno. Poco después, en 1838, Christian Friedrich Schönbein mostró la reversibilidad de ese proceso y en 1845 William R. Grove presentó su prototipo de “batería de gas” que producía electricidad con dos electrodos alimentados por hidrógeno y oxígeno, separados por un electrolito ácido y que hoy consideramos como la primera pila de combustible.

Así de antiguas son las pilas de combustible. Concebidas veinte años antes de la publicación del Origen de las Especies de Darwin (1859) y desarrolladas sobre todo a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, son reactores electroquímicos capaces de convertir directamente la energía química de un combustible como el hidrógeno en electricidad con eficiencias en torno al 40% (eficiencia de conversión eléctrica) que pueden llegar incluso hasta el 80-85% con cogeneración de energía, aprovechando el calor residual.

Si el invento es tan antiguo y tan eficiente ¿cómo es que no se usan esos dispositivos? Esa podría ser la bienintencionada pregunta de algún ciudadano interesado en el tema. Se trata de una pregunta que debe ser respondida varias veces, porque tiene varias lecturas. En primer lugar, las pilas de combustible se usan. Se fabrican, se venden, se compran, hay empresas y puestos de trabajo dedicados a ellas en exclusiva. Se usan por ejemplo en aplicaciones aeroespaciales, en la Estación Espacial Internacional y antes en otros programas de la NASA. Ah claro... en el espacio... ¡Pero

¹ La eficiencia de los motores de explosión convencionales de nuestros automóviles es en torno a un 25%

no en Tierra! Efectivamente, en el espacio y no en Tierra porque sólo en Tierra y no en el espacio nos permitimos procesos de generación de energía con producción asociada de basuras de las que creemos deshacernos en chimeneas de todo tipo, desde las más conspicuas de una central térmica hasta los tubos de escape de nuestros coches, o los depósitos subterráneos de residuos radiactivos.

Sin embargo, para que las pilas de combustible puedan llegar a constituir una pieza clave en el nuevo modelo resultante de nuestra re-evolución energética, serán necesarios diversos avances radicales en todas y cada una de las áreas de producción y almacenamiento de hidrógeno, así como en el diseño de las propias pilas de combustible.

Así por ejemplo, las actuales pilas poliméricas, que resultan las más adecuadas para el transporte dada su baja temperatura de trabajo contienen platino como material catalizador, tanto en el electrodo negativo (oxidación del hidrógeno) como en el positivo (reducción del oxígeno). La sustitución del platino por otro catalizador más barato y eficiente (especialmente para la reducción del oxígeno) es un reto tan difícil como necesario para que estas pilas acaben alimentando no sólo los sistemas de energía aeroespaciales en los que el precio es secundario, sino también nuestros sistemas terrestres, donde siempre ha sido más rentable contaminar.

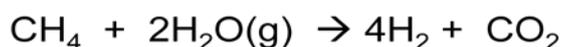
Cada tipo de pila de combustible tiene sus propios retos. Por ejemplo, las pilas de combustible poliméricas podrían beneficiarse de unas temperaturas de trabajo algo más elevadas (200°C en lugar de los actuales 80°C) por razones que van desde el envenenamiento del catalizador de platino a la gestión del agua o del calor residual, mientras que las pilas de combustible de óxido sólido, que funcionan a 900-1000°C se beneficiarían de una temperatura de trabajo algo menor, que permitiera el uso de materiales más baratos (especialmente los interconectores de celdas) y una mayor estabilidad a largo plazo.

Pero las pilas de combustible son sólo una de las áreas con revoluciones pendientes asociadas a una posible economía del hidrógeno. Además del consumo eficiente de hidrógeno quedan pendientes el almacenamiento, así como la generación barata, eficiente y sostenible del propio hidrógeno, o de cualquier derivado equivalente como combustible (como por ejemplo metanol o etanol).

En lo que respecta al almacenamiento, las tecnologías actuales llevan al almacenamiento a alta presión, que es relativamente poco eficiente. La revolución en este campo apunta al descubrimiento (¿o deberíamos llamarlo invención?) de nuevos

materiales que sean capaces de absorber hidrógeno en su seno en gran cantidad, al menos un 7% en peso. Además dicho hidrógeno debería encontrarse lo suficientemente estabilizado en la estructura huésped como para no suponer una manipulación complicada o peligrosa y lo suficientemente poco como para ser desabsorbido con un mínimo gasto energético. Entre los materiales propuestos y en vías de investigación para almacenamiento de hidrógeno se cuentan diversos hidruros metálicos, nanotubos de carbono o simplemente materiales carbonosos ultraporosos, así como nuevas estructuras híbridas compuestas por núcleos inorgánicos con bloques espaciadores orgánicos que permiten controlar su porosidad cuantitativamente a nivel nanométrico. La revolución definitiva en este campo, no obstante, sigue pendiente.

Y también sigue pendiente la revolución (o revoluciones) relacionada(s) con la generación del hidrógeno. Porque a diferencia de lo que a menudo se puede leer en artículos más irresponsables que divulgativos, el hidrógeno no es una fuente de energía (¡inagotable, se lee a veces en la prensa!) sino un vector energético y como tal necesita de energía primaria para su generación. Actualmente, la producción de hidrógeno procede muy mayoritariamente del reformado de gas natural (en torno al 90-95% del hidrógeno generado a nivel global), una reacción de alta temperatura que procede en dos etapas y produce un mol de dióxido de carbono por cada cuatro moles de hidrógeno generado



En este caso, el gran reto es la implementación de procesos de generación de hidrógeno renovable, es decir, procesos que usen cualquier tipo de energía renovable para su generación, en lugar de combustibles fósiles. Podemos considerar, por ejemplo, la electrólisis del agua mediante electricidad solar fotovoltaica, un proceso que a su vez podría considerarse como un modo de almacenamiento de dicha electricidad renovable y que podría contribuir a paliar el carácter intermitente de la misma (véase más abajo). La eficiencia del proceso sería no obstante relativamente baja, en función de la eficiencia de conversión fotovoltaica, de modo que para la obtención de hidrógeno solar sería mucho más eficiente la conversión directa de energía solar en energía química (H₂) mediante procesos de fotodisociación del agua. En esta simple idea subyace otra de las grandes revoluciones pendientes, el descubrimiento de fotocatalizadores o electrocatalizadores que faciliten la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno

mediante la absorción de un fotón sin o con la ayuda de la electricidad, respectivamente. Todo ello, a ser posible, a temperatura ambiente, aunque sin desdeñar el potencial de procesos de alta temperatura. Cuando se invocan los fotocatalizadores “filosofales” capaces de transmutar el agua en combustible, a menudo se oyen voces expertas “eso ya lo intentamos en los años setenta... y no funcionó” Mi consejo sería escuchar esas voces, que arrastran una experiencia inconmensurable pero también recordar que en Ciencia el mayor logro es conseguir el éxito donde otros fracasaron antes.

Revoluciones pendientes en fuentes primarias de energía. La energía solar

Si en el campo del vector hidrógeno esperan varias revoluciones pendientes, en el campo de las fuentes primarias de energía no son menores los retos. El objetivo global debe ser la sustitución paulatina pero tan rápida como sea posible de las fuentes primarias convencionales basadas en la quema de fósiles por otras que no emitan contaminantes en general y gases de efecto invernadero en particular. Ello nos deja a las energías renovables como diana preferencial a la que apuntar. Pero el cofre de las renovables ha sido y es un cajón de sastre con muchas y muy dispares herramientas tecnológicas, entre las que se encuentran tecnologías maduras, como por ejemplo la eólica, junto con tecnologías muy verdes (no sólo en razón de su benignidad medioambiental, sino también en cuanto a nivel de alcance de su pleno potencial) como la solar fotovoltaica. Es en este último grupo donde las revoluciones científicas, conceptuales y más radicales podrían suponer una mayor contribución al necesario cambio de modelo energético y por tanto donde más necesario es el concurso de los científicos. En los siguientes párrafos nos centraremos por tanto en la conversión de energía solar, como paradigma de sector renovable en tránsito hacia desarrollos impensables hace tan sólo una década.

La Figura 5 muestra un diagrama de flujo de energía útil (exergía) en nuestro planeta. Las diversas fuentes de energía primaria son múltiples, de variada condición y características muy dispares. Pero en todo caso queda claro que los combustibles fósiles que vienen alimentando nuestro metabolismo social son sólo una parte relativamente pequeña de los flujos de energía. Eso sí, los combustibles fósiles se acumularon durante millones de años para brindar una energía condensada, barata, sucia y fácil de usar que nos ha servido para llegar donde estamos. Pero los más grandes potenciales de energía incluidos en este diagrama simplemente no sabemos

aprovecharlos. La energía de fusión, la eterna esperanza de los humanos más tecnooptimistas cuenta con ingentes cantidades de Deuterio en los océanos, si bien para lograr la fusión a temperaturas aceptablemente bajas (sólo 100 millones de grados) nos hace falta Tritio. Por otra parte, la vulcánica cantidad de energía candente en las entrañas de nuestra Tierra nos pilla un poco lejos, o un poco honda como para explotarla a fondo. Y la mayor paradoja es por qué todavía no explotamos masivamente la energía del Sol, que nos llega tan generosa y universalmente como ninguna otra energía.

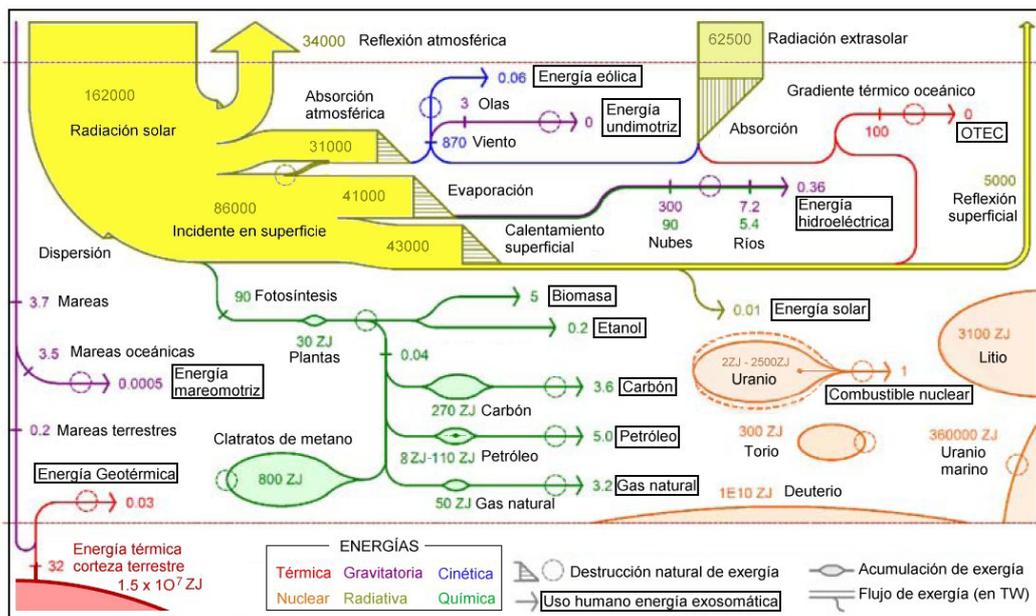


Figura 5. Flujos y depósitos globales de energía transformable en trabajo (exergía). Adaptado de Hermann, 2006. Cabe destacar las grandes incertidumbres de las estimaciones relacionadas con depósitos de energía en general. Por ejemplo, las estimaciones de reservas de petróleo oscilan desde los 8ZJ (reservas probadas y recuperables actualmente) hasta los 110ZJ (no necesariamente recuperables). Del mismo modo, las reservas de Uranio oscilan entre 2ZJ (depósitos probados y económicamente viables) hasta los 2500ZJ (considerando reactores nodriza que generan más combustible del que consumen). Por el contrario, los distintos niveles de radiación solar no están sujetos a este tipo de incertidumbres. La suma de todas las variantes de uso humano de exergía asciende a 18.5TW. Los 86000TW de la radiación solar que llega a la superficie terrestre suponen casi 5000 veces esa cantidad.

Efectivamente, nos hemos empeñado, y parece que seguimos empeñados, en recolectar energía de depósitos dispersos, remotos y escondidos, de futuros tan inciertos que ni siquiera los más técnicos especialistas pueden ponerse de acuerdo en la magnitud de sus reservas. A esa categoría de tesoros ocultos pertenecen no sólo los fósiles combustibles (y más recientemente los Clatratos de metano apresados en lo más profundo de los océanos) sino también combustibles minerales como el uranio, cuya

contribución como recurso energético es tan indeterminada que da pie a que diversos expertos la cuantifiquen en valores que oscilan entre los 2 ZJ ($2 \cdot 10^{21}$ Joules) y los 2500ZJ, dependiendo de si se consideran estrictamente los depósitos probados y económicamente viables o si se consideran yacimientos por descubrir y reactores nodriza que generan más combustible del que consumen y que vienen siendo la gran promesa de la energía nuclear desde que se iniciaron sus aplicaciones pacíficas hace 50 años. La existencia de Uranio en las aguas de los océanos (a razón de 0.003ppm) amplía la promesa del combustible de fisión por antonomasia hasta lo inimaginable. Como inimaginable es que podamos extraer ese recurso disperso hasta lo atómico de forma eficiente, barata y sin dañar el entorno en el que se diluye. Además de Uranio también hay oro y otros metales preciosos en los océanos pero los costes de extracción han sido y son prohibitivos.

Y aquí llega la gran paradoja: la radiante energía del Sol, que no hay que ir a buscarla, ni extraerla, que nos llega todos los días, no la aprovechamos ¿Acaso no sabemos cómo hacerlo?

Tabla 2. Potenciales teóricos y prácticos de los distintos tipos de energías renovables

Tipo de Energía Renovable	Potencial Teórico (TW)	Potencial práctico (TW)
Hidroeléctrica	4.6	1.5
Geotérmica	12-30	
Eólica	50	2
Biomasa	7-12	5-7
Solar	120,000	600

Fuente: LEWIS, N.S. California Institute of Technology

Las tecnologías de conversión de energía solar son diversas pero se pueden agrupar en tres grandes categorías:

Energía solar térmica. Intercambio de calor

Energía solar fotovoltaica. Separación e-/h+ en la interfase entre dos semiconductores

Energía solar fotoelectroquímica. Id. en la interfase electrodo-electrolito

La conversión de energía solar en energía térmica mediante simples flujos de calor es la más sencilla y más madura de las tres. Comprende desde la modalidad de baja temperatura, representada por los paneles solares térmicos para agua caliente

sanitaria que se empiezan a ver en algunos de nuestros tejados, hasta las nuevas centrales solares térmicas de espejos cilindro-parabólicos (temperaturas intermedias) o de torre (altas temperaturas) que calientan un fluido para producir vapor y con él electricidad. A pesar de su madurez, y de que sus costes de producción empiezan a ser competitivos, no debemos olvidar que estas tecnologías también podrían beneficiarse de investigaciones científicas relacionadas por ejemplo con i) materiales absorbentes selectivos (con gran absorción en todo el rango del espectro solar y bajas emisiones infrarrojas) de alta estabilidad térmica y bajo coste, ii) recubrimientos autolimpiables basados en nanotecnología para minimizar el mantenimiento de los espejos y heliostatos o iii) nuevos materiales o dispositivos que permitan almacenar la energía generada para compensar la naturaleza intermitente intrínseca de la energía solar. En este último campo se investiga el uso de sales fundidas como almacén de energía térmica con resultados prometedores. Todos ellos aportarían desarrollos y mejoras incrementales que, no obstante, podrían suponer la diferencia entre el fracaso o el éxito comercial de estas tecnologías.

Sin restar importancia a los desarrollos mencionados para la energía solar térmica, es en los campos de la energía solar fotovoltaica y fotoelectroquímica donde más revoluciones científicas quedan pendientes.

De estas dos modalidades de energía solar, la conversión fotoelectroquímica es la menos conocida por el público y probablemente la que mayores desarrollos requiere para llegar al mercado. Consiste en la separación electrón/hueco, no en una interfase de semiconductores n y p, como en la fotovoltaica, sino en la interfase entre un electrodo (semiconductor, óxido...) y el electrolito de la celda fotoelectroquímica. Esta tecnología permite bien la separación electrón-hueco para dar lugar a un fotopotencial y por tanto a una celda solar generadora de electricidad, como por ejemplo las celdas de tipo Grätzel (Grätzel, 1991), o bien la reacción química de electrón y hueco por separado, cada uno en un electrodo, para dar lugar a energía química, por ejemplo en forma de hidrógeno y oxígeno a partir del agua. A pesar de avances importantes en esta línea (Khaselev y Turner, 2004) el descubrimiento de los materiales definitivos, especialmente para la evolución de oxígeno, sigue pendiente.

En el área de la conversión solar fotovoltaica, el objetivo principal debería ser reducir el coste, porque éste es el principal problema que ha dificultado su generalización. Otras limitaciones como la relativamente baja eficiencia de los paneles fotovoltaicos (12-15%) son obviamente factores a mejorar pero no constituyen el factor

limitante. Al fin y al cabo el “combustible” de esta tecnología es gratis, y el 15% de gratis es gratis, un aspecto éste claramente diferencial con otras tecnologías “térmicas” que tampoco se caracterizan por una eficiencia elevada (un automóvil convencional tiene en torno a un 25% de eficiencia).

Así pues, las revoluciones científicas que permitirán la generalización de la tecnología solar fotovoltaica serán muy especialmente aquellas que contribuyan a reducir drásticamente el coste de los materiales que componen las celdas y que suponen la mayor parte del coste de los dispositivos completos. El material de uso más extendido actualmente es el silicio. En su forma monocristalina produce mayores eficiencias de conversión pero es extremadamente caro; el silicio policristalino y, en mayor medida el silicio amorfo son más baratos pero menos eficientes.

El elevado coste del silicio no se deriva de su escasez. Al contrario que metales pesados como el platino, el silicio es un elemento superabundante en la corteza terrestre (el segundo elemento más abundante después del oxígeno). Sin embargo, requiere de costosos procesos para su reducción a la forma elemental y sobre todo, requiere de muy costosos procesos para su purificación hasta los niveles necesarios para una eficiente conversión fotovoltaica (Si de 99.999% de pureza). Existen tecnologías para conseguir ese nivel de pureza y mucho más. De hecho la industria de semiconductores para microelectrónica precisa de silicio no de 5, sino de 8 o 9 “nueves” para la fabricación de sus chips. Pero son tecnologías caras.

Una de las mayores revoluciones científicas pendientes sería el desarrollo de procesos que permitan la obtención y purificación de silicio solar más barato que los actuales. La otra posible cara de esta revolución consistiría en el descubrimiento de nuevos materiales y dispositivos intrínsecamente más baratos que el silicio pero con prestaciones y eficiencias al menos equivalentes.

Una energía solar fotovoltaica más barata y a ser posible más eficiente que la actual cambiaría sin duda muchas cosas, pero no afectaría a una de las peores características de este tipo de energía: la intermitencia. Efectivamente, la irregularidad de la producción en función de la irradiación y los ciclos día/noche se esgrimen a menudo como factores que podrían impedir una dependencia total de las energías renovables. Es por ello que el almacenamiento de energía, que trataremos en breve, será otro de los temas de máxima importancia en nuestro nuevo y mejorado modelo energético.

Pero antes analicemos brevemente cómo se adecúa actualmente la producción de electricidad a un consumo que en ningún caso es constante o predecible. Las claves los dan procesos de generación de electricidad múltiples y con características complementarias junto con una extensa (y redundante) red de distribución. Así por ejemplo, las centrales nucleares, cuya costosa puesta en marcha invita a su funcionamiento ininterrumpido, suelen ofrecer una producción constante y continua que sirve de base para un suministro que se complementa adecuadamente con centrales de ciclo combinado, más flexibles en relación a su producción. También se dan procesos ocasionales de almacenamiento, casi exclusivamente en forma de bombeo de agua en centrales hidroeléctricas.

¿Cómo tendrá que cambiar ese esquema actual para poder utilizar un modelo energético plenamente sostenible? Probablemente tendrá que cambiar en la naturaleza de sus piezas pero no en el planteamiento de sus mecanismos. Es decir, la estabilidad del sistema seguirá dependiendo de la existencia de fuentes de generación complementarias (eólica y solar pueden ambas ser intermitentes, pero en relación a diferentes criterios), de una red robusta y extensa con capacidad de distribuir excedentes, una red que presumiblemente pasará de distribuir electricidad generada de forma centralizada en centrales remotas a gestionar un modo mixto de generación centralizada y distribuida y, finalmente, nuevas (y viejas) formas de almacenamiento de energía. Al bombeo hidráulico en presas se tendrían que añadir varios otros sistemas de almacenamiento de energía solar, como por ejemplo el mencionado más arriba basado en sales fundidas que aumentaría muy significativamente la autonomía de las centrales solares térmicas, así como también el almacenamiento en forma de vectores energéticos como el hidrógeno (o el aluminio), o el almacenamiento en baterías recargables que discutiremos a continuación.

Almacenamiento de energía ¿Energía o Potencia?

Las baterías son un invento muy antiguo. Volta ideó la primera en 1800, no para alimentar nada con electricidad sino para desprestigiar la hipótesis de su colega Galvani sobre electricidad animal. Ese invento dio pie a que toda una serie de científicos con apellido de unidad eléctrica o magnética (Ampere, Oersted, Ohm, Faraday...) crearan el germen revolucionario del electromagnetismo que hizo posible todas nuestras tecnologías de generación y consumo de electricidad. Pero la primera batería recargable, que se pudo usar como forma de almacenar energía, fue el acumulador de Planté, el

bisabuelo de las actuales baterías de plomo, que fue inventado el mismo año de 1859 en el que vio la luz el libro de Darwin “El origen de las especies a través de la selección natural”. El acumulador de Planté llegó en un momento idóneo para alimentar los primeros coches eléctricos, que se habían empezado a desarrollar en los años 1830s y que de hecho precedieron a los de motor de combustión de cuatro tiempos que hoy dominan nuestros mercados gracias a mecanismos de selección artificial. De hecho, el primer coche en superar la barrera de los 100Km/h fue “La Jamais Contente” francés, en 1899. Los coches con motores de combustión interna eran por entonces ruidosos y apesados, o sea, como ahora, pero además había que arrancarlos a mano, con una manivela. Paradójicamente, fue la introducción del motor de arranque eléctrico alimentado con baterías de plomo (Cadillac, 1913) uno de los desarrollos clave para que la selección artificial llevara a la extinción del coche eléctrico.

Esta breve historia de evolución tecnológica nos sirve para entender por qué no se han desarrollado y optimizado baterías recargables para tracción eléctrica de vehículos. La conjunción tecnológica entre la producción en cadena de vehículos de combustión interna y la extracción y destilación masiva de petróleo acabaron de hacer económicamente inviable el desarrollo de vehículos eléctricos. Pero a diferencia de la selección natural, la selección artificial brinda a veces segundas y hasta terceras oportunidades. La segunda oportunidad del coche eléctrico fue en los años 70 coincidiendo con la crisis del petróleo. La tercera y definitiva es ahora, cuando por razones de pura supervivencia social no tendremos más remedio que abrazar la opción tecnológicamente preferible desde el punto de vista de la sostenibilidad y dejar de tirar los costes no internalizados de la tecnología “barata” por el tubo de escape.

Afortunadamente, no sólo de coches viven los fabricantes de baterías, y la industria de las recargables ha florecido en las últimas décadas gracias al advenimiento de la electrónica de consumo. Videocámaras, ordenadores portátiles y teléfonos móviles con prestaciones rápidamente crecientes han impulsado el diseño de nuevas baterías recargables que han transitado en poco más de una década de la tecnología del Níquel-Cadmio (contaminante y con efecto memoria) a la de Níquel-Hidruro Metálico, a la de Litio y finalmente a la de Ion-Litio. Además, estos mercados demandan baterías de recarga cada vez más rápida, más ligeras, con mayor densidad de energía y mayor tiempo de vida, características todas ellas que no sólo responderían a la demanda del mercado de electrónica de consumo sino también al de tracción eléctrica de vehículos.

De forma que los desarrollos del primero podrían estar sirviendo también al despegue del segundo.

De hecho, ya existe un claro precedente en este sentido: La pequeña compañía norteamericana Tesla Motors fabrica desde el año 2008 un deportivo Roadster eléctrico impulsado por celdas de ion litio (¡6831 celdas!) de 18x65mm del mismo tipo que se emplea en ordenadores portátiles. Pero además de grandes dosis de energía condensada que dé lugar a muchos kilómetros de autonomía (El nuevo Roadster alcanza 393 Km sin recargar) un coche eléctrico también necesita de grandes potencias que permitan aceleraciones razonables (El Roadster acelera de 0 a 100Km/h en 3.7 segundos). Y las baterías siempre han adolecido de bajas potencias.

Efectivamente, las baterías de todo tipo se caracterizan por una densidad de energía relativamente elevada pero baja densidad de potencia (Figura 6). Ello se debe a la naturaleza electro-iónica de las reacciones electroquímicas en que se basan, es decir, a que su funcionamiento involucra no sólo procesos de transferencia y conducción de electrones, sino también procesos de difusión de iones que son mucho más lentos que los primeros.

Los condensadores, por su parte, son capaces de almacenar energía eléctrica y liberarla de forma muy rápida, dando lugar a corrientes y potencias elevadas gracias a su mecanismo puramente electrofísico. Sin embargo la capacidad de almacenamiento de un condensador es tan baja que su densidad de energía es extremadamente reducida. De forma que, tal y como se resume en la Figura 6, tenemos dispositivos complementarios, las baterías (también las pilas de combustible) con alta energía y baja potencia específicas y los condensadores con muy alta potencia y muy baja energía específicas.

Además de la tradicional combinación de baterías y condensadores que se da en el diseño de todo tipo de dispositivos eléctricos y electrónicos se han empezado a desarrollar desde hace unos lustros un nuevo tipo de dispositivos que se conocen como supercondensadores y que aspiran a ocupar la zona óptima del Gráfico de la Figura 6: altas energías y altas potencias.

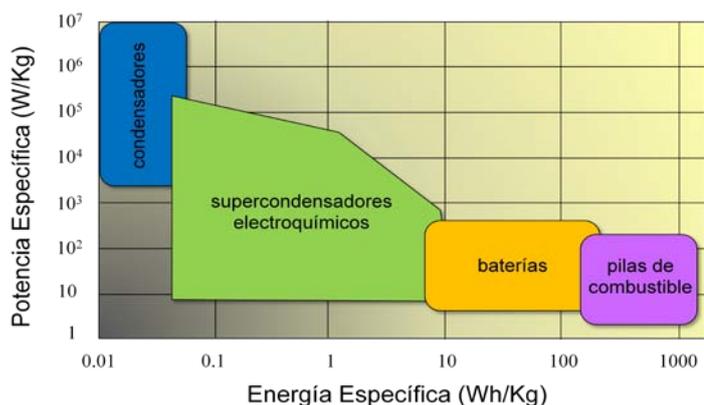


Figura 6. Diagrama esquemático de las densidades de energía y potencia para distintos dispositivos de almacenamiento de energía.

Los primeros supercondensadores se diseñaron con materiales carbonosos ultraporosos como electrodos, brindando un mecanismo electrofísico de almacenamiento de carga superficial mediante la doble capa eléctrica formada en la interfase electrodo-electrolito. La nueva generación de supercondensadores basan su acción en mecanismos electroquímicos pero puramente superficiales y aspiran a mejorar sus prestaciones a lo largo de la zona diagonal de la gráfica potencia-energía. He aquí una nueva revolución científica pendiente en fase de realización: el desarrollo de nuevos materiales y/o nuevos mecanismos y dispositivos para el almacenamiento de energía que provean al mismo tiempo alta potencia y una gran energía específica. Y por supuesto a bajo coste (Actualmente el Roadster de Tesla Motors se vende por 100,000 dólares).

Ahorro y eficiencia energéticos

Coste, coste, coste...Se diría que todo se limita a reducir los costes finales de nuestras tecnologías de ultra-altas prestaciones. Pero deberíamos preguntarnos si lo primero que deberíamos rebajar no es el coste de nuestras expectativas.

Existe un coche eléctrico en el mercado, que no es deportivo ni aspira a serlo. Es el REVA, de origen indio, el vehículo eléctrico más vendido del mundo y que se puede comprar en España por unos 15,000 Euros.

La pregunta es si realmente necesitamos acelerar de 0 a 100 en menos de cuatro segundos.

Dos siglos de energía abundante y barata (si bien sucia y no renovable) nos han acostumbrado al derroche y al exceso y nos han conducido al reinado de lo prescindible. Pero no se trata aquí de hacer disquisiciones de tinte moral, aunque sí de marcar grandes

líneas de acción y evolución. Tampoco vamos a defender la necesidad de retornar a niveles de producción y consumo de un siglo atrás, aunque hay economistas que defienden desde hace tiempo la necesidad de decrecer, como Dennis Meadows (The Limits of Growth, 1972), pero sí la necesidad absoluta de ajustar todos nuestros procesos de producción y consumo de bienes y servicios a un modelo de mayor eficiencia energética.

Los análisis de ciclo de vida o de eficiencia energética en la cadena de suministro son ejemplos de un tipo de trabajo de investigación no convencional pero que irá adquiriendo más y más importancia en el futuro. Son ejercicios que nos revelan factores ocultos, incluso insospechados que afectan al ahorro y la eficiencia energéticos y nos muestran que ese ahorro va más allá de apagar las luces o usar el transporte público.

Un delicioso ejemplo de este tipo de análisis es el publicado por Stefanie Böge en 1993 (von Weizsäcker et al., 2001) en el que analizaba el flujo y transporte de materias primas, componentes y productos necesarios para fabricar y distribuir un yogur de fresa en Stuttgart. A la ya escandalosa cifra de los 3500 kilómetros recorridos por leches, envases, tapas y producto había que añadir otros 4500 Km si se tenían en cuenta los viajes de los proveedores del fabricante de yogures. La Figura 7 muestra una representación gráfica de ese desmesurado trasiego (izquierda) junto con un esquema mucho más racional y eficiente para producir el mismo producto

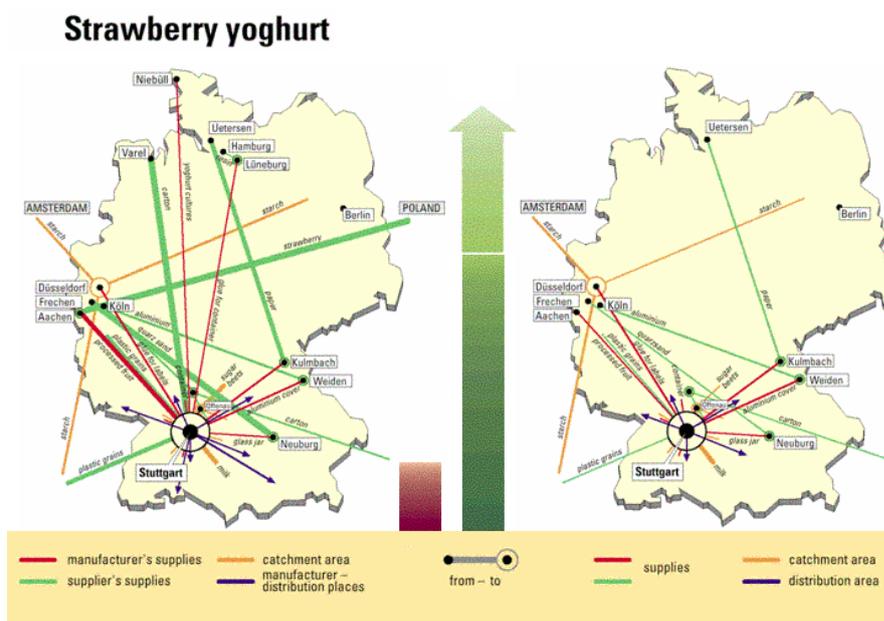


Figura 7. Eficiencia energética y cadena de suministro. A la izquierda, diagrama de los flujos de materias primas y producto para la fabricación y distribución de un yogur de fresa en Stuttgart. A la derecha, el mismo producto se puede fabricar con mucho menos gasto de energía en transporte mediante procesos de producción y procesamiento a nivel local. Fuente: von Weizsäcker, 2001

Pero además de la necesidad de innovar en los análisis de gestión de la energía, ciclos de vida y cadena de suministro, el campo del ahorro y la eficiencia energéticos también espera alguna que otra revolución científica para progresar. En esa línea se encuentran los materiales electrocrómicos o fotocrómicos para uso en ventanas mal llamadas “inteligentes”. Pero en mi opinión, la mayor contribución en esta área la aportará el desarrollo de diodos emisores de luz (LEDs) blancos de alto brillo y bajo coste. Efectivamente, el hecho de que la bombilla incandescente sea el prototipo de idea brillante por antonomasia, no puede ocultar el hecho de que una de esas bombillas es más una estufa que da luz, ya que el 90% de la energía que consume se pierde en forma de calor. En su momento fue un gran invento y ha durado lo que ha durado la energía barata. Actualmente se van sustituyendo paulatinamente por bombillas de bajo consumo que en esencia contienen la tecnología de los tubos fluorescentes. Pero el futuro del alumbrado en nuestras casas será de los LEDs, cuando la investigación científica los dote de las tres Bs: blancos, brillantes y baratos. Ese punto no está lejos. A pesar de su modesto comienzo en tonos rojos, los LEDs ya apuntaban un gran potencial gracias a su alta eficiencia de conversión y durabilidad (del orden de 50,000 horas). En 2005 se descubrió (de forma serendípica) el primer material con una emisión de amplio espectro adecuado para un LED blanco en forma de pequeños nanocristales de seleniuro de cadmio (CdSe). Lo cierto es que si el Cadmio suponía un riesgo ocupacional y medioambiental en las baterías de Níquel-Cadmio también lo es en un LED. Quizá tendríamos que añadir una nueva B a las condiciones necesarias para que nuestro LED blanco, o cualquier otro material llegue a nuestras casas: Benigno con el medioambiente.

Epílogo y Conclusiones

Un futuro con un modelo energético sostenible puede parecer utópico, los más críticos dirían que imposible. Sin embargo, estoy convencido de que más imposible les parecería a nuestros bisabuelos, aquellos que vivieron el cambio del siglo XIX al XX, que máquinas más pesadas que el aire pudiesen volar, o que se pudieran iluminar casas y calles durante la noche con algo que no fuesen llamas.

Efectivamente, hace tan sólo un siglo, las casas se iluminaban quemando combustibles fósiles. Tendríamos que imaginar a un joven Albert Einstein, evaluador de patentes en Suiza, durante los primeros años del flamante siglo XX, escribiendo a mano y con toda probabilidad a la luz de un quinqué de queroseno los manuscritos sobre su

Teoría de la Relatividad (restringida) finalmente publicados en 1905. Y el caso es que en 1879 ya se había inventado la bombilla incandescente (doblemente, por Swan en Inglaterra y Edison en Estados Unidos). Pero cambiar una tecnología barata y sucia por una limpia y cara no es fácil y a los humanos civilizados les llevó un siglo llevar a cabo ese cambio en sus casas. Ha llegado el momento de hacer ese cambio también en las calles. Pero la forma más viable de hacerlo pasa por convertir toda una serie de tecnologías energéticas limpias pero caras en tecnologías limpias, más eficientes y baratas. Este capítulo ha pretendido mostrar cómo para llevar a cabo ese cambio, esa revolución energética, son necesarias y ya urgentes un raudal de revoluciones científicas de todo tipo que sólo se podrán conseguir a través de la generación de nuevo conocimiento, revoluciones que van mucho más allá de desarrollos incrementales y que deberían ser la contribución de científicos de muy diversas ramas de conocimiento a la implementación de un nuevo modelo sostenible de generación y consumo de energía.

Bibliografía

- Gómez Romero, Pedro “Un planeta en busca de energía” Editorial Síntesis, 2007
- Hermann, W.A. “Quantifying Global Exergy Resources” Energy Vol 31, 1349 (2006)
- Khaselev, Oscar; Turner John A.* “A Monolithic Photovoltaic-Photoelectrochemical Device for Hydrogen Production via Water Splitting” Science, 1998, 280(5362), 425-7.
- Lewis, Nathan S. "Powering the Planet", MRS Bulletin, 2007, 32, 808.
- Lewis, Nathan S. Energy and Transportation: Challenges for the Chemical Sciences in the 21st Century. The National Academies Press, 2003 Capítulo 5., p. 35
- Lewis, Nathan S. and Nocera, Daniel G. “Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization”. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 24 Oct 2006 vol. 103(43)15729–35
- Miller, G. Tyler Jr. “Living in the Environment” 11th Ed. Brooks/Cole, 2000
- O'Regan , Brian; Grätzel Michael “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films” Nature 1991, 353, 737-40
- Orr, Franklin M. Jr.; Benson, Sally M. “Sustainability and Energy Conversions” Materials Research Society Bulletin, Vol 33, 297-305 (2008)
- von Weizsäcker, Ernst Ulrich; Lovins, Amory B.; Lovins, L. Hunter
Factor Four: Doubling Wealth, Halving Resource Use - The New Report to the Club of Rome Earthscan Pub Primera Ed. 1998, 2001.