



LA HERENCIA DEL PLANETA

PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

Mariano Marzo

Los combustibles fósiles permitieron un gran avance en nuestra sociedad y fueron fundamentales para la revolución industrial. Sin embargo, la disponibilidad finita, y las cada vez mayores dificultades para extraerlos hacen más necesario que nunca replantearnos el uso que hacemos de ellos.

Con anterioridad a la Revolución Industrial, el desarrollo de las sociedades humanas quedaba acotado por la tasa a la que eran capaces de aprovechar la radiación solar y sus transformaciones al incidir sobre nuestro planeta. Durante la mayor parte de la historia de la humanidad, la producción de alimentos y de combustibles estuvo limitada por la baja eficiencia de la fotosíntesis, así como por un suministro insuficiente de nutrientes a las plantas. Los rendimientos medios de los cultivos eran bajos, lo que ocasionaba desnutrición crónica y hambrunas recurrentes. El almacenamiento de la energía estaba seriamente coartado por la baja densidad energética de la biomasa –unos 4 kilovatios-hora (kWh) por kg de paja y entre 4 y 4,7 por kg de madera–, mientras que la potencia específica de las principales fuerzas motrices era inferior a 0,1 kilovatios (kW) de potencia sostenida para los seres humanos y a 0,5 kW para los animales de tiro. Aun así, las sociedades antiguas fueron capaces de aumentar gradualmente el uso per cápita de la energía aprovechando el agua y el viento y desplegando una creciente fuerza de trabajo, mayoritariamente integrada por esclavos y animales.

■ LA REVOLUCIÓN DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

La extracción a gran escala y la combustión de los combustibles fósiles significaron un cambio fundamental en el tipo e intensidad de los usos de la energía. Estos compuestos (carbón, petróleo y gas) abarcan un amplio muestrario de moléculas orgánicas, generadas tras un complejo y largo proceso. Este implica la lentísima transformación, durante períodos de entre cien mil a cien millones

de años, de la materia orgánica sintetizada en la biosfera y luego acumulada como detritus animales y vegetales en el fondo de cuencas sedimentarias (lagos, mares y océanos) y que posteriormente, a medida que iba siendo enterrada bajo sucesivas capas de sedimento, sufrió la acción combinada de altas presiones y del calor generado por la desintegración de los elementos radioactivos de la corteza terrestre. La madre naturaleza ha posibilitado, mediante el proceso descrito, el almacenamiento de la energía

solar en los enlaces químicos de los átomos de hidrógeno y carbono que integran las moléculas de los hidrocarburos fósiles.

Durante milenios, los humanos han obtenido los alimentos, el calor y la potencia mecánica necesarios para su supervivencia de la radiación solar y de la transformación casi inmediata de esta (flujos de agua y viento), así como de la energía proporcionada por conversiones metabólicas y de la biomasa que ocurrían en cuestión de meses, unos pocos años o, a lo sumo, unas

pocas décadas. Por el contrario, los combustibles fósiles, con la excepción de la turba, son el resultado de intensos cambios de la biomasa durante lapsos geológicos. Utilizando un símil económico, podemos considerar que las sociedades premodernas dependían para su desarrollo de unos ingresos solares, instantáneos o mínimamente retardados, que se reponían de forma constante. En cambio, la civilización moderna basa su esplendor en el uso de una herencia solar. Un capital que estamos dilapidando a gran velocidad y que, a la postre, tan solo habrá sido disfrutado durante una pequeña fracción del tiempo que se necesitó para acumularlo.

«LA MADRE NATURALEZA HA POSIBILITADO EL ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR EN LOS ENLACES QUÍMICOS DE LOS ÁTOMOS DE HIDRÓGENO Y CARBONO QUE INTEGRAN LAS MOLÉCULAS DE LOS HIDROCARBUROS FÓSILES»



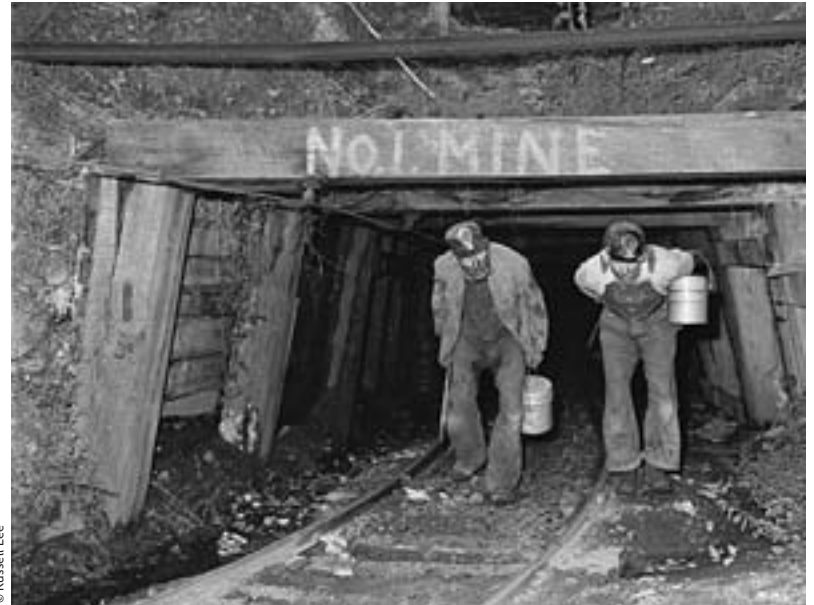
Las sociedades preindustriales eran, en teoría, energéticamente sostenibles en un horizonte temporal de miles de años, aunque en la práctica muchas de ellas comprometieron su desarrollo por una excesiva deforestación y erosión del suelo. Por el contrario, la civilización moderna se basa en el aprovechamiento, sin duda insostenible, de una herencia solar única que no puede ser repuesta a la escala temporal de una civilización. Pero esta herencia nos ha dado acceso a unos recursos energéticos muy concentrados y fáciles de almacenar y que han podido ser utilizados a un ritmo creciente. El uso de los combustibles fósiles ha permitido a los humanos superar los límites al consumo de energía impuestos por la baja eficiencia de la fotosíntesis y por los bajos rendimientos de las corrientes de agua y aire. Como resultado, el consumo energético global ha aumentado a unos niveles sin precedentes.

Un intento de reconstrucción del consumo mundial de energía primaria (biomasa, combustibles fósiles, renovables y nuclear) muestra un ascenso desde algo más de 10 exajulios –10 EJ = 10×10^{18} julios o $2,778 \times 10^{12}$ kilovatios-hora (kWh)– en 1750 a casi 20 EJ un siglo después, para luego alcanzar los 45 EJ en 1900, aproximarse a los 100 EJ a mitad del siglo pasado y, finalmente, situarse por encima de 400 EJ a principios de este. A pesar de que en el transcurso del siglo xx la población mundial se multiplicó por un factor cercano a cuatro (de 1.600 a 6.100 millones) el promedio global de consumo anual de energía primaria per cápita se duplicó, pasando de 28 a 65×10^9 julios (de 7.778,4 a 18.057 kWh), mientras que el consumo anual promedio de combustibles fósiles per cápita se multiplicó por más de cuatro. Y estas cifras resultan aún más impresionantes si las expresamos en términos de energía útil.

Los continuos avances técnicos han mejorado las eficiencias medias de todas las conversiones energéticas comerciales, muchas de ellas por un orden de magnitud. En realidad, la cuantificación de los servicios de la energía (calor-frío, luz, movimiento...) proporciona una visión aún más certera del crecimiento experimentado por el flujo energético global que la simple medición de los *inputs* de energía primaria.

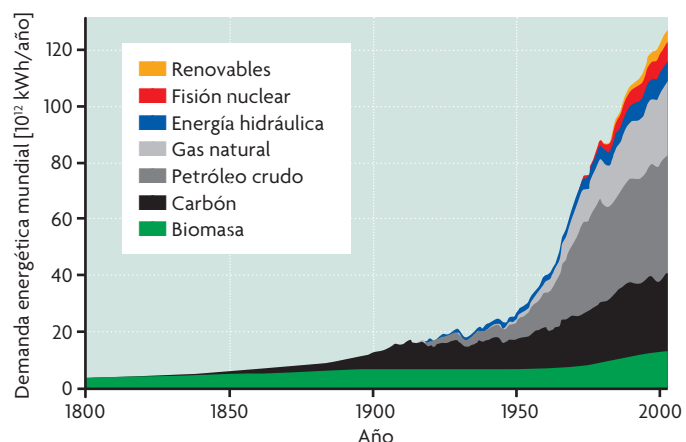
■ LA DEMANDA ACTUAL DE COMBUSTIBLES FÓSILES

En 2008, los combustibles fósiles representaron el 81,25% de toda la energía primaria consumida en el mundo. Un porcentaje que se repartió de la siguiente manera: 27% para el carbón, 33,1% para el petróleo y 21,15% para el gas. Y las previsiones de futuro nos indican que el dominio de dichos combustibles se pro-



La explotación a gran escala de los depósitos de carbón permitió el despegue de la civilización industrial. Junto con el petróleo y el gas natural, el carbón continúa siendo un combustible de amplia utilización, con los problemas ambientales que eso comporta. En la imagen, mineros norteamericanos en la década de los cuarenta del siglo pasado.

«EN 2008, LOS COMBUSTIBLES FÓSILES REPRESENTARON EL 81,25% DE TODA LA ENERGÍA PRIMARIA CONSUMIDA EN EL MUNDO. Y LAS PREVISIONES NOS INDICAN QUE SU DOMINIO SE PROLONGARÁ EN LAS PRÓXIMAS DÉCADAS»



Evolución de la demanda mundial de energía en el período 1800-2000. Destaca la inflexión de las curvas a partir de 1950 y el papel destacado de los hidrocarburos fósiles, gracias a los cuales el consumo energético global se ha multiplicado por cinco a lo largo de la segunda mitad del siglo xx.



longará en las próximas décadas. Así, la Agencia Internacional de la Energía (AIE), en su último informe sobre el panorama energético global (*World Energy Outlook 2011*), contempla tres escenarios sobre la evolución de la demanda mundial de energía primaria en el horizonte del 2035.

El primero, denominado de «Políticas actuales», proyecta a dónde nos conduce la rutina actual y prevé un ligero descenso, hasta el 79,46%, de la participación de los combustibles fósiles en el *mix* energético global (29,26% carbón, 27,8% petróleo y 22,4% gas), lo que comportaría un incremento de las emisiones de CO₂ del 45,4% respecto a los niveles actuales y que la temperatura media del planeta se incremente en más de 3,5°C.

El segundo, llamado de «Nuevas políticas», asume que todos los compromisos y planes anunciados por los gobiernos en lo relativo a la reducción de gases de efecto invernadero y a la eliminación de subsidios a los combustibles fósiles acabarán cumpliéndose, aunque estos últimos todavía representarían en 2035 el 73,7% del *mix* global (23,5% carbón, 27,8% petróleo y 22,4% gas), lo que conllevaría un aumento del 21% de las emisiones de CO₂ y de unos 3,5°C en la temperatura media de la Tierra.

El tercero se denomina «450» porque presupone que los gobiernos adoptarán un abanico de drásticas medidas para limitar a 450 partes por millón equivalentes de CO₂ la concentración de gases de efecto invernade-

ro en la atmósfera, lo que posibilitaría, con un 50% de probabilidad, que la temperatura media del planeta no aumentara en más de 2°C. Pero, incluso en este escenario, el porcentaje de los combustibles fósiles en el *mix* energético global sería del 62,3% (16,7% carbón, 25,6% petróleo y 20% gas).

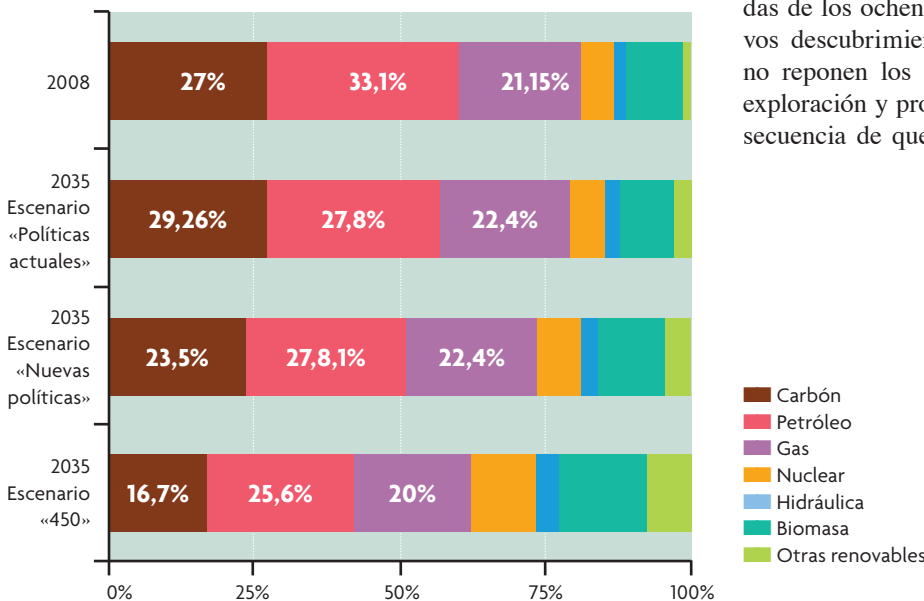
■ LA INCÓGNITA DEL FUTURO

Ante estas previsiones de uso continuado de los combustibles fósiles cabe preguntarse por la disponibilidad de reservas y de recursos. El consenso generalizado es que estos son suficientes para cubrir la demanda en las próximas décadas. Según datos de BP, al ritmo actual de consumo las reservas probadas de petróleo, gas y carbón rondan, respectivamente, los 46, 59 y 118 años. Sin embargo, eso no significa un futuro exento de problemas, ya que la incógnita no reside tanto en la cantidad de reservas y recursos atesorados en el subsuelo del planeta como en ver si seremos capaces de extraerlas al ritmo y a los precios adecuados.

De hecho, un informe del National Petroleum Council advierte de una realidad preocupante: «El mundo no se está quedando sin recursos fósiles, pero el aumento continuado de la extracción de petróleo y gas a partir de fuentes convencionales presenta cada vez más riesgos y estos constituyen un serio obstáculo para asegurar la demanda a medio plazo.» ¿Cuál es el significado preciso de esta aseveración? ¿A qué riesgos se refiere?

Algunos son de naturaleza técnica. Desde las décadas de los ochenta y noventa del siglo pasado, los nuevos descubrimientos de hidrocarburos convencionales no reponen los volúmenes extraídos, y los costes de exploración y producción están aumentando como consecuencia de que cada vez se trabaja en regiones más

**«LA INCÓGNITA NO
RESIDE TANTO EN LA
CANTIDAD DE RESERVAS Y
RECURSOS ATESORADOS
EN EL SUBSUELO DEL
PLANETA, SINO EN SI
SEREMOS CAPACES
DE EXTRAERLAS AL
RITMO Y A LOS PRECIOS
ADECUADOS»**



Diferentes previsiones de distribución de la demanda mundial de energía primaria según la Agencia Internacional de la Energía. El *mix* energético futuro varía según los diferentes escenarios imaginables: si seguimos las políticas actuales, si se cumplen las nuevas políticas anunciadas y el escenario «450», que implicaría que los gobiernos tomaran medidas radicales para limitar la emisión del CO₂ a la atmósfera. Pero en cualquiera de los casos, los combustibles fósiles continuarán teniendo un papel determinante en las próximas décadas.





remotas, en ambientes más extremos y se perfora a mayor profundidad. Además, la producción mundial de petróleo y gas convencional en los campos actualmente en explotación está experimentando un declive promedio del 6,7% anual, que podría alcanzar el 10% si se descuidan las inversiones. Por otro lado, la industria petrolera sufre una alarmante escasez de personal, la relación entre la energía obtenida del petróleo extraído y la energía consumida en el proceso de extracción está empeorando rápidamente y, por tanto, cada nuevo barril añadido a las supuestas reservas tiene un menor contenido energético neto.

Además de estos problemas técnicos, existen otros de claro matiz e implicaciones geopolíticas relacionadas con la concentración de las reservas convencionales en unos pocos países. Y a todo lo expuesto hay que añadir las incertidumbres existentes en torno a la concreción de las imprescindibles inversiones para aumentar la producción. Los principales obstáculos que podrían limitar o retrasar dichas inversiones son esencialmente de naturaleza geopolítica. Entre ellos cabe citar: las políticas de control del ritmo de extracción de recursos ejercidas por los gobiernos; el «petronacionalismo», que impide o limita el acceso de las compañías privadas internacionales a la explotación de los recursos; y la inestabilidad política, las amenazas terroristas y los conflictos militares que suelen acompañar a la «maldición de los recursos».

Las consideraciones precedentes se refieren básicamente a reservas y recursos convencionales de petróleo y gas. Bajo esta denominación se agrupan aquellos cuya extracción puede llevarse a cabo mediante técnicas tradicionales, aplicables a hidrocarburos que pueden fluir con relativa facilidad a favor del gradiente de presión que se establece entre el subsuelo y la superficie tras la perforación de un pozo. Sin embargo, con el fin de obviar algunos de los inconvenientes mencionados con anterioridad, la industria se está volcando cada vez más en la explotación de los denominados recursos no convencionales. Estos se extraen mediante técnicas que van desde la minería tradicional hasta la inyección de agua caliente o de agua a gran presión para fracturar las rocas.

Los hidrocarburos no convencionales agrupan una amplia gama de sustancias líquidas, semilíquidas o plásticas, conocidas como petróleos no convencionales, entre las que se encuentran las arenas asfálticas de Canadá (*oil sands* o *tar sands*), los petróleos ex-

«LOS HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES SON MÁS COSTOSOS DE EXTRAER Y SU EXPLOTACIÓN SUPONE UN MAYOR IMPACTO MEDIOAMBIENTAL Y GENERA MÁS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO»



Las plataformas *offshore* ponen de manifiesto la sofisticación a la que ha llegado esta forma de minería, pero también las dificultades a las que se enfrenta a causa del progresivo agotamiento de los yacimientos fácilmente alcanzables. En la imagen, una plataforma de la compañía BP en Trinidad y Tobago.

tra-pesados de Venezuela y los esquistos de petróleo (*oil shales*) de muchas partes del mundo. Y también comprenden sustancias gaseosas, conocidas como gas no convencional, que incluye el gas de esquisto (*gas shale*), el metano de las capas de carbón (*coal bed methane*) y el gas de formaciones rocosas poco permeables (*tight gas*).

Dentro de este último tipo de recursos no convencionales de gas todavía no se incluyen los hidratos de gas. Estos son sustancias sólidas naturales, con apariencia de nieve helada, caracterizadas por una estructura clatrática (o en jaula) formada por un entramado cristalino de moléculas de agua que atrapan en su interior moléculas de hidrocarburos gaseosos, principalmente metano. Dentro de su «jaula de hielo» las moléculas de metano están comprimidas por un factor aproximado de 164, de modo que a presión y temperatura atmosféricas un metro cúbico de hidrato de gas libera 164 metros cúbicos de gas y 0,8 metros cúbicos de agua. Este factor de concentración confiere una especial relevancia a los sedimentos que contienen los hidratos de gas, tanto desde el punto de vista de su potencial energético, como desde una perspectiva de los riesgos geológicos y del cambio





climático. Los hidratos de gas son estables bajo condiciones de presión moderadamente alta y de temperatura moderadamente baja. Estas condiciones se dan tanto en tierra firme, en el permafrost de las regiones árticas, como en los sedimentos localizados en los fondos oceánicos y bajo otras grandes masas de agua, como por ejemplo los mares interiores. Su cantidad podría doblar las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas natural juntas. Sin embargo, hoy por hoy, acceder a estos hidratos de gas es extraordinariamente complicado y no se ha diseñado un método eficaz para obtener de ellos la energía deseada. El principal problema es que estos compuestos sólidos son inestables a condiciones de presión y temperaturas normales, de modo que el gas se escapa a la atmósfera si los intentamos recuperar en superficie por técnicas mineras y, por otra parte, la posible extracción del gas mediante sondeo tras la inyección de agua caliente se ve, por lo general, limitada por la baja permeabilidad de los sedimentos que contienen los hidratos de gas, los cuales suelen aparecer como nódulos o acumulaciones discontinuas.

Los hidrocarburos no convencionales amplían la disponibilidad potencial de petróleo y gas y, además, presentan la ventaja de que su distribución geográfica suaviza el problema geopolítico de la concentración de reservas convencionales en Oriente Medio y Rusia. Sin embargo, a pesar del avance de la técnica y de la reducción de costes, los hidrocarburos no convencionales son más costosos de extraer y su explotación su-



El gas es transportado mediante gasoductos o, previamente licuado, en barcos apropiados. El proceso de licuación permite reducir el volumen del gas hasta 600 veces.

pone un mayor impacto medioambiental y genera más emisiones de gases de efecto invernadero. Además, obtenerlos implica un balance energético (relación entre la energía obtenida y la utilizada en el proceso de producción) que puede llegar a ser diez veces menor que el de los hidrocarburos convencionales. Unos inconvenientes que sin duda deben tenerse muy presentes a la hora de ponderar el futuro de los combustibles fósiles.

■ A MODO DE CONCLUSIÓN

Los combustibles fósiles permitieron un gran avance en nuestra sociedad y fueron fundamentales para la revolución industrial. No obstante, la disponibilidad finita y las cada vez mayores dificultades para extraerlos hacen más necesario que nunca replantearnos el uso que hacemos de ellos e iniciar una revolución energética.

No exagero. No se trata de una nueva transición energética, sino de una revolución en toda regla. Porque para comprender la magnitud del desafío que encaramos basta comparar la demanda de energías fósiles que en el pasado fue necesaria para reemplazar la biomasa con la previsible demanda de combustibles no fósiles (renovables y nuclear) que necesitaríamos en el futuro para reemplazar petróleo, gas y carbón. Porque resulta que a finales de la década de 1890, cuando la cuota de la energía procedente de la biomasa cayó justo por debajo del 50% del suministro total de la energía primaria del mundo, eran necesarios cerca de 20 EJ ($5,556 \times 10^{12}$ kWh) de oferta adicional de combustibles fósiles para sustituir todo el consumo aportado por la biomasa reemplazada. Sin embargo, en 2010, el mundo utiliza los combustibles fósiles a un ritmo anual cercano a los 400 EJ, lo que significa que los nuevos suministros de energía no fósil necesarios para desplazar al carbón, al petróleo y al gas son 20 veces mayores en términos energéticos de lo requerido durante la transición previamente comentada. Además, un análisis histórico de la velocidad a la que se han sucedido los cambios en el uso de los combustibles muestra que una vez que el carbón, el petróleo y el gas alcanzaron el 5% del total de la producción global de energía, todavía fueron necesarios 35, 40 y 55 años, respectivamente, para que dichos combustibles fósiles consiguieran hacerse con el 25% de la cuota del mercado energético. ☺

BIBLIOGRAFÍA

- BP, 2011. *BP Statistical Review of World Energy June 2011*. Bp. Londres. Disponible en: <<http://www.bp.com/statisticalreview>>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011. *World Energy Outlook 2011*. OECD. París.
- NPC, 2007. *Facing the Hard Truths about Energy*. National Petroleum Council. Washington.

Mariano Marzo. Profesor del Departamento de Estratigrafía, Paleontología y Geociencias Marinas, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona.