

Las posibilidades de encontrar fuentes de energía limpias, abundantes y gratuitas

El continuado incremento en el uso de la energía y la importancia que ha adquirido desencadena un debate en torno a las posibles alternativas que deberían desarrollarse para alcanzar un modelo sostenible que ofrezca perspectivas de futuro. Este artículo analiza el estado actual del consumo de energía en el planeta, así como las previsiones acerca de la cronología del agotamiento de los combustibles fósiles, y expone las alternativas energéticas de las que se dispone en la actualidad: sus potencialidades y sus limitaciones.

El uso y el consumo de la energía es una medida del estado de nuestra civilización, ya que la disponibilidad de uso de los recursos energéticos condiciona de manera muy determinante nuestro modo y calidad de vida, pero también amenaza con socavarla, puesto que el ritmo escalofriante al que se consumen los combustibles fósiles, mayoritarios en el “mix” energético mundial, es una de las principales causas del cambio climático, como acaba de certificar la cumbre de París,¹ celebrada la primera quincena de diciembre de 2015.

Ignacio Mártil es catedrático de Electrónica de la Universidad Complutense de Madrid y miembro de econoNuestra

Los principales responsables del insostenible consumo energético de las últimas décadas son, por un lado, ciertos aspectos del modo de vida de parte de la población del planeta, localizada principalmente en los países industrializados, que suponen menos del 25% del total de la población mundial y por otro, el aumento demográfico experimentado en las últimas décadas. En efecto, en 1950 la tierra tenía 2.500 millones de habitantes, en el año 2000 ya superaba los 6.000 millones, hoy día somos 7.300 millones y la mayoría de previsiones pronostican que en 2050 la población se acercará a los 9.500 millones de habitantes.

¹ 21^{er} Cumbre sobre Cambio Climático. París, 2015. Disponible en: <http://www.cop21.gouv.fr/en/>

El agotamiento de los combustibles fósiles obliga necesariamente a repensar como puede seguir manteniéndose nuestra civilización de una manera sostenible y respetuosa con el planeta en su conjunto.

A lo largo del texto, se utilizará con frecuencia el concepto *energía* que es importante no confundir, como ocurre habitualmente, con el de *potencia*.²

Los combustibles fósiles: situación actual y perspectivas de futuro

El consumo actual de energía en el mundo. Dominio de los combustibles fósiles

La siguiente tabla presenta los datos de consumo energético en el mundo desde 1980 diferenciados por tipo de combustible. Habitualmente, el consumo de cada combustible se expresa en unidades específicas: barriles de petróleo, metros cúbicos de gas, toneladas de carbón o uranio, etc. Con objeto de facilitar el análisis, se expresan todas las cantidades en TWh (billones de Wh), utilizando los factores de conversión adecuados.

Tabla 1: Energía consumida en el planeta (TWh) en las cuatro últimas décadas

| Combustible y energía consumida (TWh) | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 |
|---------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Petróleo | 38.400 | 40.000 | 45.500 | 47.400 |
| Gas Natural | 15.800 | 22.000 | 27.100 | 33.000 |
| Carbón | 20.500 | 26.100 | 27.400 | 41.600 |
| Nuclear | 2.200 | 6.000 | 7.500 | 8.000 |
| Renovables | 5.200 | 7.000 | 8.700 | 18.000 |
| TOTALES | 82.100 | 101.100 | 116.200 | 148.000 |
| % Combustibles fósiles | 91% | 87% | 86% | 83% |

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Informe BP³ y de la U.S. Energy Information Administration.⁴

² La potencia se mide en vatios (W) y en múltiplos de vatios: kW (1.000 W), MW (1.000.000 W), GW (1.000.000.000 W) y TW (1.000.000.000.000 W). La potencia de una gran central eléctrica es del orden de 1 GW, un gran aerogenerador tiene 5 MW y una lavadora 2 kW. Por otra parte, para saber cuánta energía produce o consume una central o una lavadora respectivamente, hay que conocer durante cuánto tiempo están en funcionamiento, de manera que Energía = Potencia x Tiempo. Las unidades de esta son entonces el kWh, MWh, etc. Un consumo o producción energético anual puede expresarse como potencia dividiendo la energía por el número de horas de un año, 8.760.

³ «BP Statistical Review of World Energy», BP, junio 2015. Disponible en: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

⁴ «U.S. Energy Information Administration», *International Energy Statistics*. Disponible en: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject>

El consumo de energía no ha dejado de crecer y ni siquiera las sucesivas crisis político-energéticas del siglo pasado (1973, guerra del Yom Kipur; 1979, revolución en Irán; 1990, primera Guerra del Golfo Pérsico; 2003, segunda Guerra del Golfo Pérsico) y la gran crisis económica de 2008 han frenado esa tendencia. En 2014 el consumo se elevó a 160.400 TWh, que expresado en potencia anual se traduce en 18.3 TW. Las previsiones apuntan a que esa tendencia no se va a frenar en un futuro próximo: 20 TW en 2020, 23 TW en 2030.

Con ligeras variaciones de un año a otro, los combustibles fósiles dominan completamente las fuentes de energía de las que se sirven la mayoría de países, aunque la energía nuclear se ha estancado en los últimos años tras los desastres de Chernobil y más recientemente de Fukushima, de manera que, más de cuarenta años después de la primera gran crisis del petróleo de 1973, seguimos teniendo una enorme dependencia del petróleo, el gas y el carbón, con aportación creciente de éste último, a pesar de ser el combustible más contaminante de los tres. En el caso concreto del petróleo, esa dependencia seguirá siendo inevitable mientras los automóviles y los aviones se muevan con ese combustible, ya que más del 90% del transporte se hace con sus principales derivados: gasolina, gasoil y queroseno. Ese escenario no cambiará significativamente mientras otros sistemas de propulsión alternativos (hidrógeno, electricidad...) no se desarrollen para competir en condiciones de igualdad con los primeros.

El consumo de energía no ha dejado de crecer y ni siquiera las sucesivas crisis político-energéticas del siglo pasado y la gran crisis económica de 2008 han frenado esa tendencia

Evolución prevista del consumo y de las reservas de combustibles

Cada vez cobra más fuerza la opinión que propugna la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables. Las energías renovables se utilizaron históricamente para proporcionar energía durante las fases iniciales de la revolución industrial (biomasa; es decir, madera para alimentar las primeras calderas); ¿por qué queremos volver a utilizarlas ahora? Hay varias razones esenciales para propiciar su uso masivo:

1. No es posible seguir utilizando los combustibles fósiles sin alterar de manera irreversible el clima, tal y como se ha constatado en la última Cumbre sobre Cambio Climático celebrada en París. La combustión del carbón, gas y petróleo producen elevadas emisiones de CO₂, principal responsable del conocido como efecto invernadero.
2. La sustitución de los combustibles fósiles por la fisión nuclear plantea infinidad de problemas: el coste, la seguridad y la disponibilidad a largo plazo del combustible. No es vero-

símil que la fisión nuclear vaya a representar una alternativa energética digna de mención.

3. Los combustibles fósiles se agotan. Nos encontramos en el pico de producción de petróleo, gas y carbón. Además, la mayoría de las reservas de estos combustibles se encuentran en países políticamente inestables, por lo que sustituirlos en aquellos países que no disponen de reservas es o debería ser una absoluta prioridad.

En relación con el agotamiento, es necesario hacer un análisis por separado de cada uno de los combustibles.

- Carbón. A pesar de los más de dos siglos desde que comenzó su utilización –en el siglo XVIII–, el carbón sigue siendo abundante y sus yacimientos no están concentrados geográficamente, por lo que a corto o medio plazo no existen ni se vislumbran problemas de suministro. Con los niveles de explotación actuales, habría carbón para más de 200 años.
- Gas natural. Es el combustible fósil que se ha comenzado a utilizar más recientemente. La madurez de la tecnología de producción de energía con este tipo de combustible es muy elevada, lo que ha facilitado un incremento espectacular de su utilización. Esto ha traído aparejado un acusado descenso en las reservas conocidas, de modo que las previsiones de agotamiento se cifran en 60-80 años.
- Petróleo. Es el combustible para el que resulta más difícil estimar la duración de las reservas. El petróleo se utiliza de forma significativa aproximadamente desde 1850, aunque no fue hasta la llegada del motor de combustión interna en las últimas décadas del siglo XIX cuando comenzó a dispararse su consumo. La intensa explotación a la que ha sido sometido este recurso ha producido que sus expectativas de agotamiento se vislumbren en 40-50 años, lo que le convierte en el combustible fósil más escaso.

Casi todas nuestras tecnologías y nuestras industrias están relacionadas con productos o subproductos del petróleo. Tanto el petróleo como el gas se usan para producir energía eléctrica, transporte, lubricación, maquinaria, fertilizantes, pesticidas, plásticos, materiales compuestos o sintéticos, productos químicos, etc., por lo que el problema de su agotamiento es que todas esas aplicaciones se quedarían sin materia prima para su fabricación, al no haber hoy por hoy sustituto.

Fuentes de energía alternativas. Viejas y nuevas renovables: hidráulica, eólica y solar

Los flujos naturales de energía del planeta, impulsados principalmente por la energía proveniente del sol, así como el clima y el sistema hidrológico, son los que conocemos como fuentes de energía renovables. Se reponen continuamente de manera natural y son intrínsecamente inagotables.

Además son sostenibles en el sentido de que no impactan profundamente en el medio ambiente de una forma que impida su uso continuado en el tiempo, aunque con algunas reservas que se analizan más adelante. La utilización masiva de las energías renovables es la única opción de la que disponemos a largo plazo para un suministro de energía continuado, seguro y sostenible.

Potencialidad de los principales recursos renovables

La magnitud de los principales recursos renovables se puede entender mejor con unos datos y una imagen:

La radiación solar que incide en la superficie de la tierra durante un año es equivalente a 85.000 TW. La gran mayoría se invierte en el calentamiento del aire, la tierra y los océanos. Otra parte la convierte la naturaleza en biomasa mediante el lento proceso de la fotosíntesis; del que aprovechamos una parte en forma de alimentos. También utilizamos la energía solar almacenada durante miles de años en forma de combustibles fósiles, que en tiempos recientes se utiliza quemándolo al ritmo que he descrito en la primera parte de este artículo.

Así pues, la mayoría de esa energía no puede aprovecharse directamente, pero aún quedan cerca de 1.000 TW de radiación directa accesibles para su aprovechamiento en forma de calor o de conversión en energía eléctrica.⁵

**La utilización masiva de energías renovables es
la única opción de la que disponemos a largo plazo para
un suministro de energía continuado, seguro y sostenible**

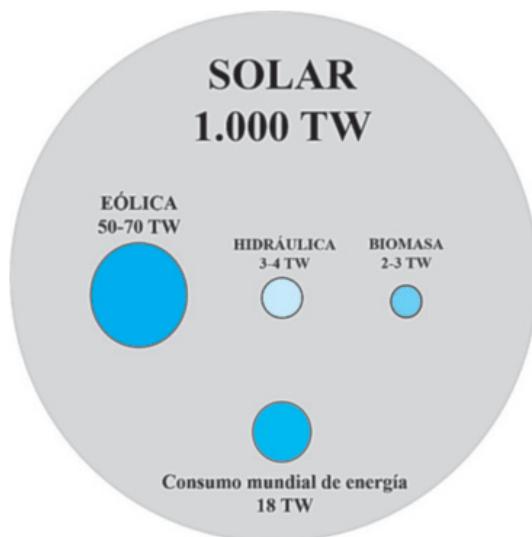
El viento es una forma de energía solar transformada. Su potencial es enorme (370 TW) aunque su utilización práctica también se reduce sustancialmente a 40-70 TW.

El ciclo del agua debido a los ríos con caudales renovados mediante la lluvia proporciona 34.000 TW, pero solo una fracción muy pequeña de entre 3-4 TW puede aprovecharse en embalses y presas hidráulicas.

Como indiqué al comienzo de este artículo, el consumo de energía mundial total es en la actualidad 18 TW. La siguiente figura muestra en términos comparativos el potencial de los principales recursos. Hay otras fuentes de energía renovables (biomasa, geotermia, energía mareomotriz, etc.), pero dada su menor capacidad en comparación con las tres principales no las analizaré aquí.

⁵ D. Elliot, *Renewables. A review of sustainable energy supply options*, IOP Publishing, Bristol, 2013.

Figura 1: Potencial de utilización de los recursos renovables al cabo de un año



El área de cada círculo es aproximadamente proporcional al potencial de cada recurso. También se muestra a escala el consumo de energía del planeta en 2014.

Tecnologías renovables: situación actual

Hidroeléctrica. Las grandes presas hidráulicas fueron las primeras en utilizar el movimiento del agua para generar electricidad. Las centrales hidroeléctricas utilizan una tecnología muy madura y desarrollada desde comienzos del siglo XX. Una central hidroeléctrica embalsa agua en una presa construida en el cauce de un río, creando una reserva de energía que puede ser liberada haciendo caer el agua almacenada sobre los álabes de grandes turbinas que con el movimiento generan energía eléctrica.

Las centrales hidroeléctricas representan la mayor fuente de electricidad de origen renovable; en el mundo había instalada a finales del año 2014 una capacidad de 880 GW. En la actualidad, cerca del 17% de la electricidad producida en el mundo es de origen hidroeléctrico.

Solar térmica y solar fotovoltaica. Los colectores térmicos para retener el calor proveniente del sol y obtener agua caliente se basan en un procedimiento simple, económico y de carácter familiar en todo el mundo.

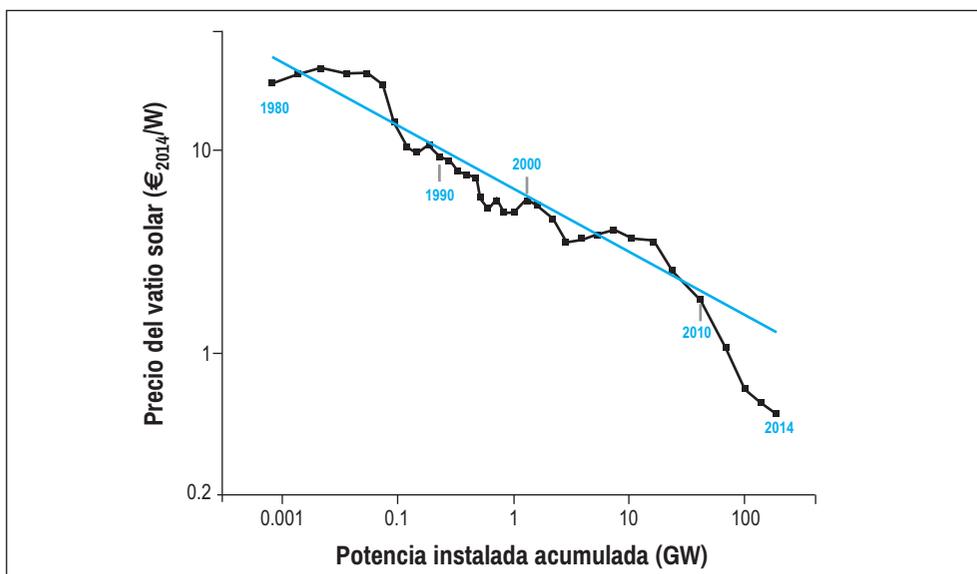
La energía solar termoeléctrica, que concentra la radiación solar mediante el uso de espejos en un foco que calienta agua genera vapor para accionar una turbina y así producir

energía eléctrica, se está empezando a desarrollar para su utilización a gran escala en zonas desérticas, aunque hoy por hoy su tecnología es muy costosa y su despliegue es todavía poco significativo, ya que en todo el mundo apenas llega a 4.5 GW.

Con diferencia, la energía solar fotovoltaica dentro de la tecnología solar es la que presenta un uso más generalizado. A finales de 2014 había instalados un total de 178 GW en todo el mundo. El uso de células solares para producir electricidad mediante el efecto fotovoltaico se está extendiendo ampliamente y los precios están cayendo rápidamente a medida que la eficiencia de las células mejora y el número de instalaciones crece, generándose economías de escala que reducen sustancialmente los costes.

El interés y el atractivo de la energía solar fotovoltaica es que su funcionamiento es silencioso, sencillo, sin partes móviles y de instalación relativamente simple. Aunque los materiales que utilizan las células solares son caros y costosos inicialmente (silicio, CdTe, CuGaInSe₂) esta situación está cambiando rápidamente conforme aumenta la cantidad de potencia instalada en el mundo. De hecho, la energía solar fotovoltaica presenta una evolución de los costes unitarios por capacidad instalada (lo que se conoce como “curva de aprendizaje”) de las más competitivas respecto a cualquier tecnología de producción de energía eléctrica, como se muestra en la figura 2.

Figura 2: Curva de aprendizaje de la energía solar fotovoltaica⁶



El eje vertical muestra el precio del vatio solar, expresado en €₂₀₁₄/W; el eje horizontal detalla la potencia instalada acumulada en el mundo, expresada en GW. Ambas escalas son logarítmicas.

⁶ Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, «Photovoltaics Report», *Institute for Solar Energy Systems*, ISE, octubre 2015. Disponible en: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>

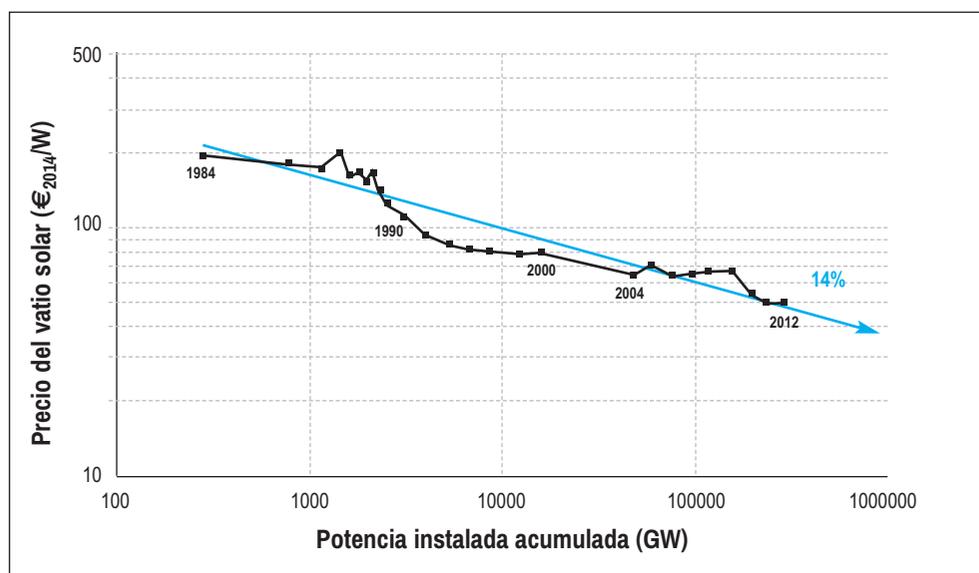
Parece probable que la tendencia marcada por la curva continúe, ya que la apuesta por esta fuente de energía es firme en gran número de países industrializados, lo que elevará sustancialmente la potencia instalada, reduciendo nuevamente los precios.

Eólica. La energía eólica es básicamente una forma indirecta de energía solar, ya que el viento se origina por el calentamiento del aire, de la tierra y del mar por la radiación solar, fenómeno que se hace especialmente relevante en lugares montañosos. La energía que se puede obtener de un molino es proporcional al cuadrado del radio de las aspas y al cubo de la velocidad del aire.⁷ Por lo tanto, cuanto más grande sea el rotor y cuanto más viento sople, más energía se obtiene.

Hoy día, la energía eólica es la segunda fuente de obtención de energía de fuentes renovables, detrás de la hidráulica. A finales de junio de 2015 había instalada en todo el mundo una potencia de 392 GW, el doble aproximadamente que de energía solar fotovoltaica.

Los costes de la energía eólica han seguido una tendencia similar a los de la fotovoltaica, tal y como se muestra en la curva de aprendizaje para esta tecnología:

Figura 3: Curva de aprendizaje de la energía eólica⁸



Eje vertical, coste de la energía eléctrica de origen eólico, expresado en $\text{€}_{2012}/\text{MWh}$. Eje horizontal, potencia instalada acumulada en el mundo, expresada en MW. Ambas escalas son logarítmicas.

⁷ Ley de Benz. Disponible en: <http://platea.pntic.mec.es/~jdelucas/centraleolica.htm>

⁸ «Exeronomics: On Energy, Economics and Growth», Disponible en: <https://exeronomics.wordpress.com/2014/11/04/part-iii-the-future-of-energy-the-future-price-of-renewables/>

Las anteriores son las principales tecnologías de obtención de energía para suministrar electricidad, calor y en menor medida, combustibles para ciertos vehículos, como es el caso del vehículo eléctrico. Un futuro energético sostenible también requerirá dedicar especial atención a cómo se utiliza la energía para evitar desperdiciarla. El tiempo de los combustibles fósiles baratos está llegando a su fin, con lo que las consideraciones de eficiencia energética cobrarán cada vez mayor protagonismo. Todo lo que se haga por mejorar el uso eficiente de la energía es poco y las energías renovables ofrecen un amplio abanico de opciones respetuosas con el medio ambiente y con muy bajas o nulas huellas de carbono.

Un futuro energético sostenible requerirá dedicar atención a cómo se utiliza la energía, dándole mayor protagonismo a la eficiencia energética

Tecnologías renovables: problemas

- Variabilidad de los recursos renovables.

Por su propia naturaleza, las fuentes renovables son variables. Esta es la principal razón que se invoca en contra de su utilización masiva. En los países que usan estas fuentes, se compensa esa variabilidad con centrales alimentadas por combustibles fósiles o uranio para asegurar el suministro.

Mientras la contribución renovable se mantenga entorno al 20-30% del total, los sobrecostes del sistema para compensar la variabilidad son asequibles en general, sobre todo si se contabilizan como beneficios los abaratamientos por las emisiones de CO₂ evitadas y por las importaciones de combustible ahorradas. Sin embargo, si las energías renovables suministran una mayor proporción de la energía a la red eléctrica, son necesarias otras medidas que aseguren el suministro. Una opción es el intercambio de electricidad entre países para equilibrar las variaciones locales o regionales. Otra posibilidad de almacenamiento es el bombeo de las grandes presas hidroeléctricas mediante energía eólica, este es un recurso que ya se utiliza en España.

- Carácter difuso de los recursos renovables e impactos medioambientales

La mayoría de los flujos de energías renovables son por naturaleza difusos, es decir, transportan una baja densidad de energía, por lo que la captura de cantidades significativas implica grandes áreas de terreno, sobre todo en el caso de la energía solar fotovoltaica y de

la eólica. En ambas situaciones se producen grandes impactos visuales que suelen generar rechazo en las poblaciones locales.

En relación con la energía eólica, varios de los problemas que acarrea el uso masivo de esta fuente de energía se derivan de sus principios de funcionamiento. Los terrenos elevados son ideales para instalar molinos, pero son muy sensibles desde el punto de vista medioambiental y los grandes generadores eólicos provocan grandes impactos visuales. La tecnología eólica marina evita buena parte de esos problemas, pero, al igual que en el caso de los parques terrestres, puede tener un impacto sobre la vida de la fauna local.

Por último, las grandes centrales hidroeléctricas también tienen impactos medioambientales severos, buenos ejemplos de ello son la presa de las Tres Gargantas en el río Yang-Tse en China o la presa de Itaipú en la frontera entre Paraguay y Brasil.

En todo caso, los impactos causados por las energías renovables son, por regla general, mucho menores que los impactos que tiene el uso continuado de combustibles fósiles para producir energía, muy evidentes en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y, por consiguiente, de cambio climático.

- Coste de los recursos renovables.

Una última consideración es el coste de los recursos renovables. La mayoría de las tecnologías renovables son relativamente nuevas, por lo que son poco maduras en términos tecnológicos y, como cualquier nueva fuente de energía, requieren de largos períodos de desarrollo y maduración. Esto hace que el coste de la unidad de energía producida sea elevado, aunque se están reduciendo rápidamente al generalizarse el uso de dichas tecnologías, tal y como he detallado previamente. De hecho, en determinadas ubicaciones geográficas caracterizadas por altos niveles de insolación y/o muy ventosas, la tecnología eólica y la solar fotovoltaica ya son competitivas en precio en comparación con las tecnologías basadas en combustibles fósiles, incluso más baratas que estos últimos.⁹

Posibilidades y expectativas futuras de las energías renovables

Uno de los motivos que impiden los cambios bruscos o rápidos en la composición del “mix” energético de cualquier país son las cuantiosas inversiones necesarias para poner en mar-

⁹ Lazard, «Lazard's levelized cost of energy analysis». Disponible en: <https://www.lazard.com/media/2390/lazards-levelized-cost-of-energy-analysis-90.pdf>

cha las infraestructuras energéticas, que implican largos períodos de amortización, en muchas ocasiones de hasta 50 años. Cerca del 50% de la capacidad eléctrica instalada en el mundo tiene menos de 20 años de vida; en el caso de España, las centrales de ciclo combinado alimentadas por gas natural son en su práctica totalidad posteriores a 1997 y representan el 25% del total de la potencia instalada. Suponiendo un período de amortización de unos 50 años, a esas instalaciones les quedan al menos 30 años de vida útil. En definitiva, los sistemas energéticos tienen una gran inercia que hace que los cambios de unas fuentes energéticas por otras se produzcan de forma relativamente lenta.

Las fuentes de energía renovables modernas (solar y eólica principalmente), que serían las que deberían suplir a los combustibles fósiles, representan hoy en día poco más del 4% de la energía eléctrica consumida en el planeta, por lo que el objetivo de que reemplacen a los combustibles fósiles durante el presente siglo se presenta como difícil y en absoluto inmediato.

No obstante, hay motivos para la esperanza. El plan actual de la UE conocido como Horizonte 2020 plantea alcanzar el 20% del total de energía obtenida mediante fuentes renovables para el año 2020, lo que parece probable que pueda llevarse a efecto.

Las fuentes de energía renovables modernas, que serían las que deberían suplir a los combustibles fósiles, representan hoy en día poco más del 4% de la energía eléctrica consumida en el planeta

Más allá de esa fecha, la hoja de ruta de la UE para 2050¹⁰ incluye una propuesta para un objetivo de entre el 55% en el escenario más moderado y 75% en el más decidido. En este caso, el 97% de la electricidad sería de origen renovable. Expectativas similares se están produciendo en otros lugares del mundo, especialmente en China, que tiene previsto llegar al 15% de su energía de origen renovable en 2020.

Llegar a nivel mundial al 100% de toda la energía proveniente de fuentes renovables para el año 2050 puede parecer una utopía, pero tal y como dice Greenpeace en su último informe: «No hay grandes obstáculos técnicos o económicos para avanzar hacia un 100% de energías renovables en el año 2050».¹¹

¹⁰ European Commission, 10 Priorities. Disponible en: http://ec.europa.eu/priorities/energy-union/index_en.htm

¹¹ Greenpeace, «Energy [r]evolution 2015». Disponible en: <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2015/Energy-Revolution-2015-Full.pdf>

Mientras tanto, durante la primera mitad del presente siglo, los combustibles fósiles seguirán dominando el suministro energético de forma mayoritaria, aunque su importancia se irá reduciendo progresivamente debido al desarrollo de las tecnologías renovables descrito en este artículo. Este cambio debe ser saludado con esperanza e ilusión, ya que lleva aparejados beneficios colaterales fundamentales, en términos de limitación de emisiones de gases de efecto invernadero principalmente.

En la recientemente celebrada Cumbre del Clima en París, se ha constatado que para frenar el aumento de la temperatura media del planeta en dos grados, la cuota de participación de las energías renovables sobre el consumo total de energía eléctrica debe subir desde el 18-20% actual al 36% en 2030. El acuerdo final alcanzado,¹² aun siendo histórico al involucrar a 195 países e incluir a todas las grandes economías del planeta, no permite ser excesivamente optimista respecto al ritmo al cual las energías renovables descritas en este artículo podrán sustituir a las basadas en combustibles fósiles.

Finalmente y por lo que respecta a nuestro país, es una prioridad nacional evolucionar hacia un modelo energético que nos proporcione seguridad e independencia en el suministro para modificar nuestra enorme dependencia exterior, que se sitúa alrededor del 70-75%. Las tecnologías renovables se presentan como una esperanza fundada para ser parte en la solución, al menos parcial, de este grave problema.

¹² Convención Marco sobre el Cambio Climático, «Acuerdo de París», CMNUCC, París, 30 de noviembre a 11 de diciembre de 2015. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>