

## Límites de las energías renovables

Gerardo Honty\*

*Todas las proyecciones de demanda energética futura muestran una tendencia creciente y que las principales fuentes primarias utilizadas continuarán siendo los combustibles fósiles. Sin embargo éstos presentan límites físicos, económicos y ambientales infranqueables. Las fuentes renovables aparecen como una alternativa, pero a poco de analizar los escenarios futuros, éstas también presentan límites de diverso tipo. Este trabajo recorre varios de estos límites y pone en duda que el crecimiento del consumo energético esperado, ya sea con fósiles o con renovables, sea viable.*

### Introducción: Prospectiva energética

**L**as dos principales agencias que realizan proyecciones de producción y uso de energía a nivel global (la Agencia Internacional de la Energía dependiente de la OCDE y la Administración de Información sobre Energía dependiente del gobierno de los Estados Unidos) pronostican un aumento del consumo energético a nivel global hacia el futuro.

La primera prevé que para el año 2035, el mundo estará consumiendo un tercio más de energía que en el presente (AIE, 2012). Por su parte la agencia estadounidense estima que para el año 2040 la demanda energética del planeta será un 56% mayor que en la actualidad (EIA, 2012).

En ambos casos, las fuentes principales de suministro energético continuarán siendo el carbón, el gas natural y el petróleo, mientras que las fuentes renovables en su conjunto, no alcanzan a cubrir un 20% de la demanda global.

Sin embargo, estas prospectivas tienen, al menos, dos límites precisos: la escasez de petróleo convencional y la amenaza del cambio climático. Respecto a lo primero, la misma AIE ha determinado que el “pico” del petróleo convencional fue alcanzado en 2006 (AIE, 2010). Los yacimientos han llegado a un grado tal de explotación que resulta inviable aumentar la producción diaria global, la cual se ha establecido en el entorno de los 70 millones de barriles diarios y no será posible incrementar la.

---

\* Sociólogo. Investigador del Centro Latinoamericano de Ecología Social –CLAES- Coordinador del Centro de Tecnología Apropiada –CEUTA-. Consultor de la UNESCO, PNUMA, PNUD.

Todo el aumento del suministro de crudo está basado en el desarrollo de los llamados “petróleos no convencionales”: arenas asfálticas, petróleo extrapesado, petróleo de esquisto, etcétera. Estos combustibles son de más difícil acceso, más costosos y tienen mayores impactos ambientales, pero las agencias estiman que a pesar de todo será posible su explotación.

Para el caso del gas natural convencional y el carbón, también existen proyecciones que muestran que estos alcanzarán su pico en el entorno del año 2025 aunque hay mayores divergencias al respecto. Sin embargo, la tecnología para explotar el gas natural no convencional se ha desarrollado rápidamente en los últimos años, particularmente en Estados Unidos, y las expectativas de contar con este combustible son altas.

Las incertidumbres relacionadas con los impactos ambientales, la viabilidad económica y la tasa de retorno energético de estos combustibles no convencionales son elevadas, aunque por razones de espacio no abundaremos en su tratamiento en el presente artículo.

El segundo límite empero, el cambio climático, parece tener fronteras más difíciles de franquear. Según el reporte de la AIE ya citado (2012) no se podría consumir más que un tercio de las reservas fósiles conocidas si se quiere evitar una catástrofe ambiental global. Es que a nivel internacional, los países han llegado a un consenso que la humanidad debe evitar un aumento de la temperatura del planeta mayor a los 2° C respecto a la media existente previo a la revolución industrial.<sup>1</sup>

Sin embargo, el carbono contenido en las reservas de carbón, gas natural y petróleo podrían liberar a la atmósfera, en caso de ser utilizados, una cantidad de dióxido de carbono suficiente como para elevar la temperatura global por encima de los 5° C.

En definitiva, ya sea por la escasez, la carestía o los irreparables daños ambientales, parecería razonable al menos dudar de la posibilidad de realización de las prospectivas de consumo, anunciadas por las agencias internacionales que venimos analizando. Vale la pena mencionar que tanto el aumento de los costos de los combustibles fósiles como los efectos climáticos adversos conllevarán una caída de las economías a nivel global con su consecuente reducción de la demanda de energía. Es decir que, por las buenas o por las malas, el aumento proyectado de consumo fósil tiene pocas oportunidades de convertirse en realidad.

También se hace necesario recordar que las proyecciones comentadas, no están considerando una distribución más equitativa del uso de la energía. Si toda la población del mundo tuviera el mismo consumo de energía per cápita que hoy sustentan los países desarrollados, el suministro energético debería multiplicarse por cuatro, una utopía inalcanzable a la luz de los recursos planetarios disponibles. Es más, la propia AIE reconoce que para el año 2035, luego de haber aumentado un tercio el consumo global de energía, aún habrá 2.800 millones de personas (un 40% de

1 Este acuerdo fue alcanzado en la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático celebrada en Copenhague en diciembre de 2009.

la población mundial) sin acceso a la energía.

Con referencia a las emisiones de dióxido de carbono, Naciones Unidas advierte en su Índice de Desarrollo Humano (PNUD, 2007) que si todos los ciudadanos del mundo tuvieran un consumo energético similar a la media norteamericana (Estados Unidos y Canadá) se necesitarían 9 atmósferas planetarias para poder absorber los gases de efecto invernadero.

### La era de las renovables

Por estas razones, muchos organismos, institutos y “think tanks” a nivel internacional están orientando todos los esfuerzos hacia una planificación energética a nivel mundial focalizada en la promoción de las energías renovables. Estas organizaciones, incluidas las agencias ya mencionadas, han trazado diversos escenarios de penetración de energías renovables en la matriz energética global para intentar sostener el crecimiento económico en un contexto de escasez y encarecimiento de los combustibles fósiles y de amenaza de cambio climático.

Por ejemplo, para el caso de la energía eólica, la Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2010), estima que para el año 2035 la capacidad instalada a nivel mundial pasará de los 120 GW que había instalados en 2008 a 1000 GW en 2035. Otra prospectiva del PNUMA más ambiciosa (UNEP, 2011) proyecta 1500 GW eólicos instalados para el 2050.

Para el caso de la energía solar la previsión de la AIE es de 410 GW en 2035 (partiendo de 15 GW en 2008), en tanto que el PNUMA proyecta 1300

GW para el 2050. Vale la pena dejar constancia que en el mejor de los casos todas las “modernas” energías renovables (sin contar las tradicionales hidráulica y biomasa) sumadas ocupan el 8% de la matriz energética futura.

Otros escenarios más osados como el de Greenpeace y el Consejo Europeo para las Energías Renovables (EREC, por sus siglas en inglés) proyectan escenarios deseables de capacidad instalada eólica de 5200 GW y solar de 4500 GW para el año 2050 (Greenpeace, 2012).

Jacobson y Delucchi (2011) por su parte, proponen 19.000 GW eólicos y cerca de 30.000 GW solares entre térmicos y fotovoltaicos, entre otras fuentes renovables, para sustituir 100% la energía fósil al 2030.

Varios de estos escenarios suponen no solo un cambio en las fuentes energéticas, sino también importantes cambios tecnológicos en los equipamientos para el uso final de la energía, como por ejemplo, la introducción de vehículos eléctricos y sistemas de iluminación eficiente.

Este somero resumen da cuenta de la presión que existirá sobre las fuentes renovables de energía para los próximos años si se quieren evitar los riesgos ambientales y la recesión económica. Sin embargo, si bien las fuentes de energía como la eólica o la solar, son efectivamente renovables (sol y viento habrá mientras la Tierra viva), los materiales necesarios para su fabricación no lo son. Y tampoco son inocuos y energéticamente eficientes los procesos para obtenerlos.

El objetivo de este artículo es analizar los factores que limitan la construcción de los escenarios renovables que se proyectan. La escasez de ciertos re-

cursos naturales necesarios para la producción de los equipos, los impactos ambientales derivados de la minería y procesado de estos recursos y una tasa de retorno energético baja, son algunos de ellos.

### Recursos naturales, metales y tierras raras

Las tecnologías para la utilización de energías renovables (eólica, solar, vehículos eléctricos) utilizan una amplia gama de minerales para su fabricación. Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) varios de estos recursos no estarán disponibles para cubrir la futura demanda de las energías renovables. Entre ellos: telurio y selenio para las células solares fotovoltaicas, neodimio y disprosio para turbinas eólicas y automóviles eléctricos, lantano y cobalto para baterías de vehículos híbridos y platino para catalizadores de automóviles y pilas de combustible (UNEP, 2010).

Otro metal muy utilizado en diversas tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables es el cobre. En el caso de la energía eólica, la turbina de un aerogenerador de 1 MW de potencia contiene 3,9 toneladas de cobre. Los sistemas solares fotovoltaicos por su parte utilizan aproximadamente la misma cantidad de cobre por MW esencialmente en cableado y transfor-

madores. Es también un componente fundamental de los colectores solares para calentamiento de agua.<sup>2</sup> Pero el cobre no es un mineral abundante. Algunas estimaciones calculan el horizonte de reservas de cobre en 25 años (Wouters et al, 2009).

El Departamento de Energía de los Estados Unidos publicó un informe especial detallando los puntos críticos del futuro de las energías “limpias” en vista de las limitaciones a la obtención de los recursos naturales indispensables para su desarrollo (DOE, 2012). El documento analiza principalmente cuatro componentes de la tecnología de energía “limpia”:

- Imanes permanentes de aleaciones de tierras raras utilizados en aerogeneradores y vehículos eléctricos e híbridos.
- Baterías avanzadas que incorporan tierras raras en sus electrodos o se basan en la química de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos e híbridos.
- Los sistemas de energía fotovoltaica utilizando semiconductores de película delgada.
- Fósforos de tierras raras se utilizan en los sistemas de iluminación fluorescentes de alta eficiencia.

---

2 European Copper Institute: [http://www.eurocopper.org/files/presskit/press\\_kit\\_copper\\_in\\_renewables\\_final\\_29\\_10\\_2008.pdf](http://www.eurocopper.org/files/presskit/press_kit_copper_in_renewables_final_29_10_2008.pdf).

**Tabla No. 1**  
**Materiales necesarios para el aprovechamiento de las energías renovables según tec-**

	Fotovoltaica (película fina)	Turbinas eólicas Imanes	Vehículos		Iluminación
			Imanes	Baterías	Fósforos
	<b>Revestimiento</b>				
Indio	X				
Galio	X				
Telurio	X				
Disprobio		X	X		
Praseodimio		X	X	X	
Neodimio		X	X	X	
Lantano				X	X
Cobalto				X	
Manganeso				X	
Níquel				X	
Litio				X	
Cerio				X	X
Terbio					X
Europio					X
Itrio					X

Fuente: DOE 2012

Las conclusiones a las que llega el informe son que los esfuerzos para acelerar la comercialización y el despliegue de estas cuatro tecnologías de energía limpia se enfrentan a considerables riesgos de desequilibrios entre la oferta y la demanda que podrían conducir a una mayor volatilidad de los precios y la interrupción de la cadena de suministro.

### Tierras raras

La disponibilidad futura de los elementos de tierras raras (ETR) es motivo de preocupación debido a las condiciones de suministro, las prácticas monopólicas de minería ambientalmente insostenibles y el crecimiento rápido de la demanda.

Según el análisis del Departamento de Estado de los Estados Unidos antes

citado, los ETR disprobio, terbio, europio, neodimio e itrio son críticos en el corto plazo. Cerio, indio, lantano y teluro son calificados en una situación “casi crítica”. Por su parte los elementos litio, cobalto, galio, manganeso, níquel, praseodimio y el samario no son considerados críticos en el corto plazo.

Una eventual crisis en el suministro de estos recursos no estaría determinada solamente por la escasez de ciertos materiales, sino también por aspectos económicos y geopolíticos. La demanda de este tipo de elementos raros se espera que crezca a un ritmo de entre 5% y 9% anual en los próximos 25 años pasando de las 113 mil toneladas actuales a 210 mil toneladas en 2025. La mayoría de las reservas de tierras raras se encuentran en zonas de difícil acceso como los

fondos oceánicos, lo cual hace riesgosa y cara su explotación.

En el contexto de la minería actual, China, tiene casi un monopolio en la mayoría de ETR y ha decidido recientemente reducir sus cuotas de exportación en un intento de asegurar su industria y la conservación de sus suministros. En 2011, más del 95% del suministro mundial de elementos de tierras raras tuvo su origen en China, la cual a su vez también tiene la mayor demanda de ETR, 65% del total. Estados Unidos es el segundo mayor consumidor, con el 15% de la demanda total. En 2010, China anunció una reducción del 40% en las exportaciones de ETR lo que creó gran inestabilidad en el mercado de estos insumos. Se espera que China continúe la reducción de las exportaciones, ya que quiere reducir la presión sobre sus reservas de tierras raras (Hatch, 2012).<sup>3</sup>

Además de las limitaciones físicas, también hay limitaciones por riesgos ambientales. Los minerales que contienen ETR a menudo tienen asociados componentes contaminantes como torio, uranio, arsénico, plomo, etcétera que pueden ser liberados durante la minería en el aire o el agua. Por otra parte, el proceso de refinamiento de metales de las tierras raras utiliza ácidos que resultan en efluentes potencialmente tóxicos. Según la Sociedad China de Tierras Raras, entre 9.600 y 12.000 metros cúbicos de gas que contiene residuos de ácido fluorhídrico, dióxido de azufre y ácido sulfúrico, se liberan con cada to-

nelada de metales raros que se extraen. También se producen aproximadamente 75 metros cúbicos de agua residual ácida y alrededor de una tonelada de residuos radiactivos.<sup>4</sup>

### **Disproσιο y Neodimio: recursos críticos**

Estos dos elementos son claves y necesarios en grandes volúmenes para la fabricación de los imanes permanentes utilizados en la fabricación de turbinas eólicas y motores de vehículos eléctricos. A nivel empresarial se estima que la industria eólica requiere de 170 kgs de ETR por cada megawatt de capacidad de los aerogeneradores fabricados (Alonso et al, 2012).

Los imanes permanentes de tierras raras de neodimio, hierro y boro son los más comúnmente utilizados para la fabricación de aerogeneradores y la tracción en los motores de vehículos eléctricos. El uso de neodimio y disprosio en estas aplicaciones es cada vez mayor debido a las ventajas de rendimiento que proporcionan. Sin embargo, los límites de su explotación para cubrir las necesidades futuras son evidentes. Hacia el año 2025 se espera que el suministro de disprosio apenas alcance a cubrir del 15% al 18% de la demanda mientras que el suministro de neodimio podría abastecer entre un 40% y 60% de la demanda (DOE, 2012; Hatch, 2012).

Algunos análisis de prospectiva tecnológica sugieren que una serie de factores técnicos y económicos podrían

3 La Unión Europea presentó una demanda ante la OMC contra estas medidas de China. Ver [http://www.wto.org/spanish/tratop\\_s/dispu\\_s/cases\\_s/ds432\\_s.htm](http://www.wto.org/spanish/tratop_s/dispu_s/cases_s/ds432_s.htm)

4 NASA, Visible Earth. Disponible en <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=77723>

cambiar las tendencias futuras. Los fabricantes de aerogeneradores están diseñando y experimentando modelos híbridos (imanes y engranajes) que utilizan menor cantidad de neodimio y otras tierras raras. Sin embargo, en el mejor escenario futuro -en el cual los nuevos modelos de turbinas híbridas sustituyen a todas las anteriores- la demanda anual de neodimio solo se reduciría en 7000 toneladas para el año 2025 lo que sería apenas un sexto de toda la demanda de neodimio de ese año (DOE, 2012). El escenario de Jacobson y Delucchi antes citado, prevé un requerimiento total de 3,8 millones de toneladas de neodimio para el año 2030.

El disprosio por su parte, es un elemento esencial en la fabricación de imanes permanentes de neodimio con el fin de mantener sus propiedades a las altas temperaturas que existen en el interior de los motores eléctricos y turbinas eólicas. Las estimaciones actuales indican que la producción de disprosio aumentará en un máximo de 6% por año. Sin embargo, a fin de satisfacer el aumento previsto de la demanda, la producción tendría que aumentar en más del doble, a un ritmo del 14% anual. Es fundamental tener en cuenta que, incluso para el más optimista de los escenarios hay déficit en el suministro futuro de disprosio (Alonso et al. 2012).

Sin embargo, estas previsiones están hechas para lo que podrían considerarse escenarios de referencia, tendencias o “business as usual”, en los cuales el suministro de combustibles fósiles

aún se mantiene en una trayectoria de emisiones de gases de efecto invernadero incompatibles con la estabilidad climática. En caso de optar por una trayectoria segura (por ejemplo el “Escenario 450” de la Agencia Internacional de la Energía<sup>5</sup> que evitaría el cambio climático peligroso) la demanda de neodimio y disprosio aumentaría en más de 700% y 2600% respectivamente, en los próximos 25 años (Alonso et al, 2012).

### Energía Solar

Los paneles solares están contruidos con materiales semi-conductores similares a los utilizados en la industria electrónica. El silicio cristalino es el material más usado para fabricar paneles solares y su presencia es abundante. La plata en cambio, utilizada como electrodo en estos sistemas parece ser la limitante fundamental debido a su escasez (tiene un horizonte de reservas menor a 25 años).

La emergente tecnología de capa fina o película delgada, que permite nuevas aplicaciones para el uso de paneles solares, se puede construir a partir de una variedad de materiales, incluyendo silicio amorfo, el arseniuro de galio (GaAs) y telurio de cadmio (CdTe), entre otros. Sin embargo, con la excepción de silicio y el arsénico, los metales necesarios para las tecnologías de película delgada son poco frecuentes.

Por otra parte, algunos de los metales de tecnología de película delgada fotovoltaica son tóxicos (por ejemplo, ar-

5 Se refiere a un escenario deseable de demanda energética cuyas emisiones no superen las 450 ppm de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

sénico y cadmio), por lo tanto puede tener impactos ambientales y sobre la salud de la población debido a las emisiones de metales durante la extracción, procesamiento del material y fabricación de los sistemas fotovoltaicos. Los altos requerimientos de energía en el “upstream” (minería, procesamiento, fabricación, etcétera) de los paneles solares son otra preocupación (NAS, 2010).

### Automóviles eléctricos

Los vehículos eléctricos también utilizan una cantidad importante de imanes permanentes de neodimio y disprosio contribuyendo con la creciente demanda anotada en el caso de los aerogeneradores. Pero también utilizan otros minerales necesarios para su funcionamiento, como el caso de los requeridos para la fabricación de las baterías.

Dependiendo de la tecnología del vehículo, las baterías suelen utilizar principalmente níquel metal hidruro (NiMH), o iones de litio (Li-ion). La demanda de litio, cobalto, níquel y otros materiales asociados a la fabricación de baterías es probable que crezca sustancialmente con el despliegue a gran escala de los vehículos híbridos y eléctricos.

Las baterías de ion-litio no utilizan tierras raras, pero pueden utilizar materiales claves como cobalto, níquel o manganeso, además de litio. Los investigadores del Laboratorio Nacional de Argonne (citado en DOE, 2012) han estimado que una batería para un vehículo eléctrico podría contener entre 3,4 y 12,7 kg de litio, dependiendo de la formulación de la batería y la capacidad de almacenamiento requerida.

Asumiendo el mayor valor, puede estimarse que sustituir los mil millones de vehículos existentes en la actualidad requerirían casi 13 mil millones de toneladas de litio, cifra que representa el total mundial de las reservas existentes de acuerdo al último reporte del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2013).

Los reportes sobre reservas de litio suelen ser sobrestimadas por el interés de las empresas de automóviles eléctricos. Sin embargo se espera que a finales de 2016 o principios de 2017, la demanda de litio crezca mucho más que la oferta.

Las baterías de NiMH más comunes por su parte utilizan una combinación que contiene lantano, cerio, neodimio y praseodimio, mientras que otras combinan níquel, cobalto, manganeso y/o aluminio (DOE, 2012). Como vimos anteriormente el suministro de varios de estos minerales está en situación “crítica” o “casi crítica”.

Utilizando las mismas fuentes de información que en el caso del litio (USGS, 2012 y DOE, 2012), la sustitución de todos los automóviles actuales por vehículos eléctricos provistos con baterías NiMH requeriría la mitad de las reservas globales de níquel y las reservas mundiales de cobalto serían insuficientes. Considerando que hacia el 2035 se espera que el parque automotor a nivel global alcance a 1.700 millones de unidades (AIE, 2012), su sustitución por vehículos eléctricos presenta serios desafíos.

### Retorno energético

Un factor no menor a la hora de evaluar cualquier fuente de energía es la “tasa de retorno energético” (TRE). Ésta es definida como la relación entre la

cantidad de energía obtenida a partir de unas ciertas fuentes y tecnologías y la cantidad de energía necesaria para su obtención. Este indicador ha ido tomando mayor relevancia a medida que la TRE de la producción de combustibles fósiles va disminuyendo como efecto de su cada vez más dificultosa extracción. La TRE del petróleo convencional era estimada en el entorno de 100 algunos años atrás (100 barriles obtenidos por cada barril equivalente de energía invertido) mientras que la TRE del petróleo no convencional explotado actualmente está en el entorno de 10.

En el caso de la evaluación de la TRE de las energías renovables el cálculo se vuelve más complejo y depende sobremanera de las fronteras que se consideran a la hora de trazar el ciclo de vida de una tecnología. Uno de los componentes clave de esta evaluación es la cantidad de energía destinada a la minería, procesamiento y transporte de los minerales utilizados para la fabricación de paneles, aerogeneradores, baterías, etcétera.

El uso de la energía relacionada con la producción de metales primarios representa casi el 20% de toda la energía industrial utilizada a nivel mundial, y el 8% del consumo total de energía. El requerimiento de energía bruta varía de 20 megajulios (en el caso del acero) hasta 200.000 megajulios (en el caso del platino) por kg de metal producido. Este requerimiento de energía depende, entre otros de la ley del mineral (concentración de cada metal en una muestra de roca, usualmente expresada en porcentaje en peso). A medida que ésta disminuye, el requerimiento de energía aumenta exponencialmente.

Una tendencia a la baja de la ley del mineral es actualmente visible para algunos metales, tales como el oro, el cobre y el níquel. Por ejemplo en 1925 era fácil hallar cobre con una ley de mineral de 25% pero hacia 1985 ésta ya había caído a 0,8% (Wouters et al 2009).

Para otros, se espera que surjan en las próximas décadas. El cambio hacia un mayor uso de fuentes renovables a nivel mundial conllevará un aumento considerable de la intensidad energética para la producción de metales. A su vez, la intensidad energética de la producción de los metales se espera que aumente debido a la utilización de minerales de menor ley (UNEP, 2013).

Pero también es necesaria la energía en la producción, transporte e instalación de los equipos de energías renovables. Los componentes metálicos de un aerogenerador, por ejemplo, representan casi el 90% en peso y más de una tercera parte de su valor. Para un proyecto de 150 MW en Estados Unidos, el transporte de sus componentes ha requerido de 689 camiones, 140 vagones de ferrocarril y 8 envíos por barco a los Estados Unidos (NSA, 2010). Todo este gasto de energía debe contabilizarse para una correcta evaluación de la TRE, de la energía eólica en este caso.

Un reciente estudio evaluó la energía necesaria para la instalación de todos los parques fotovoltaicos de España, considerando toda la energía utilizada a lo largo del ciclo de vida de los paneles solares, incluyendo minería, procesamiento, fabricación y transporte (Prieto, 2013). El estudio calculó en 2,7 la tasa de retorno energético del total de los parques. Esto quiere decir que fue nece-

sario 1 kWh de energía por cada 2,7 kWh de energía fotovoltaica entregada a la red española. Una tasa de retorno similar había sido calculada por Lenzen (2009) para una hipotética planta de 100 MW en Australia. Esto es muy bajo comparado con la TRE 100 del petróleo convencional e incluso con la TRE 10 del no convencional.

Estos datos no son solo importantes para evaluar la conveniencia de un proyecto. También son importantes porque evidencian que en la transición hacia una matriz energética más renovable, es necesaria una enorme cantidad de combustibles fósiles. No se puede mover la maquinaria necesaria para la explotación minera, ni los barcos y camiones requeridos para transportar el mineral con energías renovables.

En un contexto de escasez y encarecimiento de los combustibles fósiles, con TRE bajas y un consumo energético creciente, es posible que el tiempo disponible para la transición sea demasiado corto.

### Límites geofísicos

Otro factor limitante del desarrollo de las renovables, aunque mucho menos estudiado aún, está relacionado con la cantidad de energía libre disponible en la biósfera y la posibilidad de extraerla sin producir impactos negativos a nivel global. Vale la pena mencionarlo aunque no sea más que para tenerlo en cuenta.

Las estimaciones sobre el potencial eólico global suelen calcularse a partir de la disponibilidad de espacio para ins-

tal aerogeneradores, respetando las distancias para que la turbulencia de cada uno no perturbe el aprovechamiento eólico de los otros, multiplicado por la capacidad de generación de cada molino.

Pero este enfoque no considera los límites de la disponibilidad de energía eólica global potencialmente aprovechable, ni cuánta energía puede extraerse del sistema sin causar desequilibrios insostenibles. La disponibilidad de la energía eólica para producir energía renovable está limitada en última instancia por la cantidad de energía cinética que se genera por procesos naturales dentro del sistema de la Tierra y por la cantidad de energía del viento que puede extraer.

Miller et. al. (2011) estiman que el límite de extracción de energía eólica de la atmósfera terrestre podría ser de entre 18 y 68 TW, dada la cantidad de energía libre disponible. Sin embargo, extraer el valor máximo de este rango tendría impactos climáticos comparables a los escenarios de concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de 720 ppm, de los peores escenarios analizados.

En 2012 la capacidad eólica instalada para la generación de electricidad era cercana a los 300 GW y aportaban el 3% de la electricidad global (WWEA, 2013). Suministrar toda la electricidad requeriría de 10.000 GW instalados, es decir 10 TW, casi la mitad del límite inferior establecido por Miller et al como posible energía cinética global disponible.

El español Pedro Prieto también ha llamado la atención sobre los impactos globales de interferir a gran escala el flu-

jo natural de la energía solar y la eólica en el planeta.<sup>6</sup>

A todo esto hay que agregar además que este potencial está desigualmente distribuido concentrándose la mayor parte en regiones remotas como Siberia, el norte de Canadá y la Patagonia, y pocos recursos existen en las zonas de mayor consumo de electricidad (Lenzen, 2009).

### **Eficiencia energética**

Junto con las energías renovables, la promoción de la eficiencia energética forma parte del nuevo grupo de políticas orientadas al logro de un consumo de energía sustentable. Mejorar los rendimientos de los equipos podría conducir a una reducción del uso de energía y sus consecuentes impactos ambientales. Es más, muchos analistas suelen catalogar a la eficiencia energética como una fuente de energía renovable adicional.

Sin embargo la historia demuestra que la eficiencia energética, más que reducir el consumo lo aumenta. El primero en darse cuenta de este fenómeno, muy tempranamente, fue Jacob Stanley Jevons que en su libro *The Coal Question* publicado en 1865, advirtió que las mejoras tecnológicas introducidas en las máquinas de vapor que lograban un mayor rendimiento del carbón no disminuían su consumo, sino que por el contrario, lo aumentaban. El razonamiento es sencillo: si una tecnología abarata los costos de producción en razón de un ahorro energético, dicha tec-

nología va a proliferar, aumentando el consumo de energía global. Esto se conoció como la paradoja de Jevons (más tarde también se le llamó “efecto rebote”) y fue muy debatida en los finales del siglo XIX en plena expansión industrial británica. A inicios del siglo XXI la paradoja de Jevons parece haberse perdido en el olvido y las crisis energética y climática han puesto el tema de la eficiencia energética en el catálogo de soluciones. Pero la historia energética reciente muestra con datos contundentes la actualidad de las viejas premisas de Jevons.

La eficiencia energética está relacionada con la cantidad de energía para la obtención de un bien o servicio. Puede ser evaluada puntualmente en cada tecnología o equipamiento, o a nivel sectorial: por ejemplo un grupo de industrias, el sector transporte, o toda la producción de un país. Uno de los indicadores clave para medir la eficiencia energética a nivel global en términos comparables país a país o sector a sector es la Intensidad Energética. Este indicador mide cuánta energía es necesaria para la producción de una unidad de producto, es decir, la relación entre el Producto Bruto Interno y el consumo de energía.

Según un estudio del World Energy Council (2004) la intensidad energética cayó sostenidamente desde 1980 a un ritmo promedio de 1,5% acumulativo anual, por lo tanto cada año se requirió 1,5% menos de energía que el año anterior para obtener la misma cantidad de producto. Esto quiere decir que se ha

6 “Algunas consideraciones sobre el cambio climático, el calentamiento global y las energías renovables en aplicaciones masivas” [http://www.crisisenergetica.org/ficheros/demanda\\_CO2\\_renovables\\_PPP.pdf](http://www.crisisenergetica.org/ficheros/demanda_CO2_renovables_PPP.pdf)

reducido en un 36% la intensidad energética en los últimos 30 años a nivel global. Sin embargo, el mundo duplicó su consumo energético en el mismo período pasando de 6.633 Mteps en 1980 a 12.476 en 2012 (BP, 2013).

Otro ejemplo de la actualidad de la paradoja de Jevons nos la ofrece Juliet Schor (2011) para el caso de los Estados Unidos: *“La energía gastada por dólar del PBI se ha recortado a la mitad. Pero más que caer, la demanda energética ha aumentado, casi en un 40%. Aún más, la demanda está aumentando más rápidamente en aquellos sectores que han tenido las mayores ganancias en eficiencia -transporte y uso residencial de energía. La eficiencia en refrigeración mejoró en un 10%, pero el número de refrigeradores en uso aumentó en un 20%. En la aviación, el consumo de combustible por milla cayó en más de un 40%, pero el uso total de combustible creció en un 150% debido a que las millas por pasajero crecieron. Los vehículos presentan una historia similar”*.

Por lo tanto puede afirmarse que la eficiencia energética tampoco es una solución a los problemas de la demanda creciente de energía, sino que más bien, tenderá a profundizarlos.

### **Resolución de discordancia**

La matriz energética global es insustentable, tanto desde el punto de vista ambiental (impactos negativos a nivel local y global) como desde el punto de vista social (más de un tercio de la población mundial no tiene acceso a la energía) y económico (el consumo de hidrocarburos se sostiene gracias a un importante sistema de subsidios que su-

pera los USD 500 mil millones anuales) (AIE; 2012, 2013).

Hacia el futuro, las proyecciones internacionalmente más aceptadas prometen más de lo mismo: aumento del consumo de energía, mayoritariamente gas, petróleo y carbón y una baja penetración de las energías renovables.

La posibilidad de sustituir la demanda esperada de energía a partir de fuentes renovables, presenta unos límites nada despreciables. Para empezar, límites físicos importantes dado que las reservas o la posibilidad de extracción de muchos de los recursos minerales necesarios parece estar muy acotada. También presenta restricciones ambientales ya que la extracción y procesado de estos recursos no están exentos de impactos negativos. Y también es previsible que se enfrente con límites sociales dado que la ampliación de la minería para la obtención de los recursos necesarios así como su procesamiento hace prever un aumento de los conflictos sociales ya muy extendidos con relación a la minería “convencional”.

Por lo tanto parece bastante plausible estimar que, hacia el futuro, el suministro de energía necesario para sostener el crecimiento económico esperado (y necesario según la economía tradicional) no será alcanzable.

Esta discordancia podría resolverse de manera ordenada y con menores daños si la comunidad internacional pudiera ponerse de acuerdo en el diseño de una nueva economía, en la que el crecimiento continuo no sea el garante de la evolución humana. En un escenario de este tipo, la demanda creciente de energía ya no sería una necesidad y podría pensarse en un uso más o menos

estable de una cantidad de energía que iría pasando progresivamente de fósiles a renovables. Desde ya que esta disponibilidad energética será bastante menor que la actual.

Si este acuerdo no es alcanzado, entonces los límites energéticos se impondrán por sí solos y es previsible una entrada en recesión de la economía global. Ésta no será el resultado solo de la escasez de energía sino también de los efectos del cambio climático que se hará sentir en las economías de todos los países como viene siendo alertado desde hace varios años (Stern, 2007; IPCC, 2007).

Ni los tomadores de decisiones, ni la ciudadanía en general, parecen tomar nota de lo que nos están diciendo los datos actuales y las proyecciones futuras. La inercia desarrollista y el optimismo tecnológico nos impulsan hacia adelante irreflexivamente haciendo a un lado, cuando no negando, esta realidad evidente.

## Bibliografía

- (AIE) Agencia Internacional de la Energía  
2010 *World Energy Outlook 2010*. París. Agencia Internacional de la Energía.
- (AIE) Agencia Internacional de la Energía  
2012 *World Energy Outlook 2012*. Resumen ejecutivo. París. Agencia Internacional de la Energía.
- (AIE) Agencia Internacional de la Energía  
2013 *World Energy Outlook 2013*. Resumen ejecutivo. París. Agencia Internacional de la Energía.
- Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E.  
2012 "Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies". *Environmental Science and Technology*, 46, 3406: 3414. ACS Publications.
- BP "Statistical Review of World Energy"  
2013 <http://www.bp.com/statisticalreview>  
(DOE) U.S. Department of Energy  
2012 *Critical Material Strategy*. DOE, Washington.  
(EIA) Energy Information Administration  
2013 *International Energy Outlook 2013*. Disponible en [www.eia.gov/ieo](http://www.eia.gov/ieo)
- Hatch, Gareth "Rare Earth Elements: Dynamics in the Global Market for Rare Earths"  
2012 *ELEMENTS* v. 8, (5):341-346. (Citado en MIT: Mission 2016).
- (IPCC) International Panel on Climate Change  
2007 "Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jacobson Mark Z., Delucchi Mark A.  
2011 "Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials". *Energy Policy*, 39, 1154–1169. Elsevier.
- Lenzen, Manfred  
2009 "Current state of development of electricity-generating technologies – a literature review": Integrated Sustainability Analysis, The University of Sydney.
- Miller, L. M., F. Gans, y A. Kleidon  
2011 "Estimating maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences", *Earth Syst. Dynam.*, 2, 1–12. [www.earth-syst-dynam.net/2/1/2011/](http://www.earth-syst-dynam.net/2/1/2011/).
- (NAS) National Academy of Sciences  
2010 "Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use" The National Academy Press. Washington.
- (PNUD) Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo  
2007 *Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido*. Nueva York. PNUD.
- Prieto, Pedro A., Hall, Charles A. S.  
2013 *Spain's Photovoltaic Revolution. The Energy Return on Investment*. Springer.

Schor Juliet

- 2011 *True Wealth: How and Why Millions of Americans Are Creating a Time-Rich, Ecologically Light, Small-Scale, High-Satisfaction Economy*. Penguin Books, New York.

Stern, Nicholas

- 2007 *El Informe Stern. La verdad del cambio climático*. Barcelona. Paidós.

(UNEP) United Nations Environment Programme

- 2010 *Metal stocks in society. Scientific Synthesis*. UNEP, International Panel for Sustainable Resource Management, Working Group on the Global Metal Flows. UNEP, Nairobi.

(UNEP) United Nations Environment Programme

- 2011 *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. UNEP, Nairobi.

(UNEP) United Nations Environment Programme

- 2013 *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*.

*A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*. van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hirschier, R. UNEP, Nairobi.

(USGS) United States Geological Survey

- 2013 *Mineral Commodity Summaries*. Disponible en <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>

Wouters, Huib y Derk Bol

- 2009 *Material Scarcity, An M2i study*. Stichting Materials innovation institute, Holanda. Disponible en [http://www.m2i.nl/images/stories/m2i%20material\\_scarcity%20report.pdf](http://www.m2i.nl/images/stories/m2i%20material_scarcity%20report.pdf) (Visitado en 24 de agosto de 2012)

(WWEA) World Wind Energy Association

- 2013 *World Wind Energy Report 2012*. Disponible en [http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2012\\_final.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2012_final.pdf)