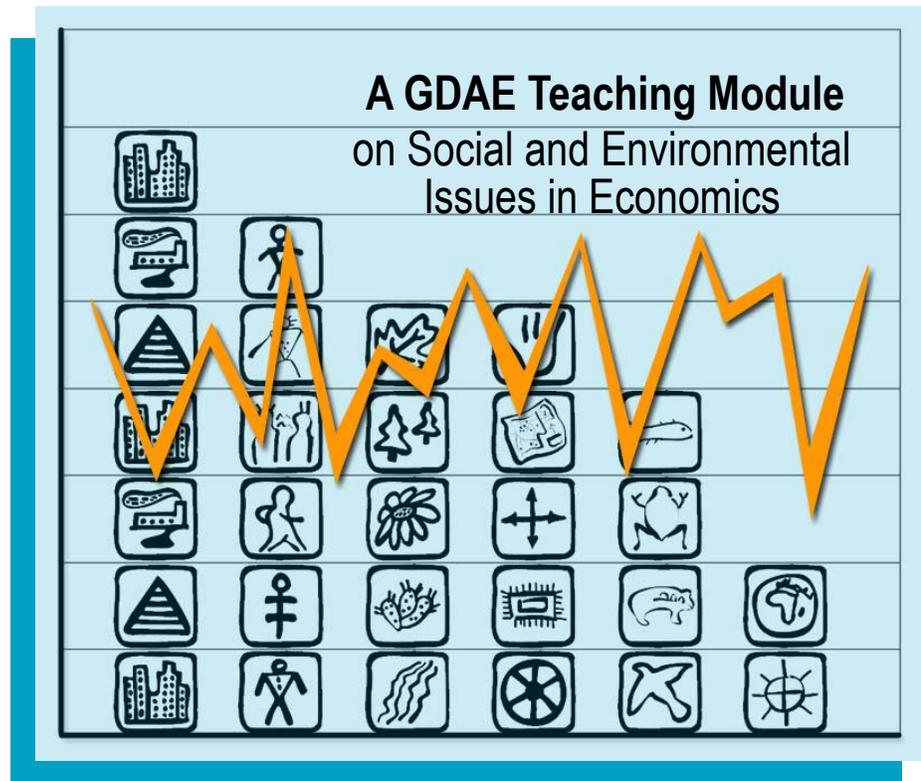


# La Economía de las Energías Renovables

por David Timmons,  
Jonathan M. Harris y Brian Roach



Global Development And Environment Institute  
Tufts University  
Medford, MA 02155  
<http://ase.tufts.edu/gdae>



Copyright © 2014 Global Development And Environment Institute, Tufts University

Se otorga, a través del presente documento, permiso a los instructores que deseen copiar este módulo con fines didácticos.

Los estudiantes también podrán descargar el módulo directamente de <http://ase.tufts.edu/gdae>.

Son bienvenidos los comentarios y opiniones que surjan del uso del curso:  
Global Development And Environment Institute

Tufts University

Medford, MA 02155

<http://ase.tufts.edu/gdae>

E-mail: [gdae@tufts.edu](mailto:gdae@tufts.edu)



© Copyright 2015 Westmill Solar Coop

David Timmons es Assistant Professor de Environmental Economics en la University of Massachusetts, Boston, Massachusetts.

Jonathan M. Harris y Brian Roach son Senior Research Associates en el Tufts University Global Development and Environment Institute, Medford, Massachusetts.

## Tabla de Contenidos

<b>1. TRANSICIONES ENERGÉTICAS .....</b>	<b>3</b>
<b>2. FUENTES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....</b>	<b>5</b>
Energía de la Biomasa.....	5
Energía Hidráulica .....	8
Energía Eólica.....	10
Energía Solar .....	13
Energía Geotérmica.....	17
Disponibilidad de la Energía Renovable .....	18
<b>3. ECONOMÍA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....</b>	<b>20</b>
Energía Neta.....	21
Intermitencia .....	23
Intensidad de Capital .....	25
Mix de Energías Renovables y Conservación de Energía .....	27
El Potencial de la Eficiencia Energética.....	29
Subsidios a la Energía .....	32
Externalidades Ambientales .....	34
<b>4. LA TRANSICIÓN HACIA LAS ENERGÍAS RENOVABLES .....</b>	<b>37</b>
Aumento de los Costes de los Combustibles Fósiles .....	37
Disminución de los Costes de la Energía Renovable .....	38
Consideración de las Externalidades de los Combustibles Fósiles.....	41
Políticas para la transición hacia las Energías Renovables .....	42
<b>RESUMEN.....</b>	<b>47</b>
<b>CUESTIONARIO .....</b>	<b>50</b>
<b>EJERCICIOS.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>53</b>
<b>RECURSOS ADICIONALES .....</b>	<b>57</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>58</b>

# LA ECONOMÍA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

## 1. TRANSICIONES ENERGÉTICAS

La historia de la civilización industrial es una historia de transiciones energéticas. En las economías agrarias, poco desarrolladas, las necesidades básicas de calorías alimenticias de las personas eran satisfechas a través de formas simples de agricultura que consistían esencialmente en métodos para capturar **energía solar** para uso humano. La energía solar almacenada en forma de leña, u otra **energía de la biomasa**, también cumplía otras funciones básicas, como la calefacción del hogar y la preparación de alimentos.

Según las economías se desarrollan y se vuelven más complejas, las necesidades de energía aumentan enormemente. Históricamente, a medida que las reservas de leña y otras fuentes energéticas de la biomasa iban resultando insuficientes para respaldar las crecientes economías de Europa y Estados Unidos, se fue recurriendo a la **energía hidráulica** (otra forma de energía solar almacenada); posteriormente al carbón en el siglo diecinueve y, por fin, al petróleo y el gas natural, durante el siglo veinte. Durante los años 50, la energía nuclear fue incorporada al mix energético.

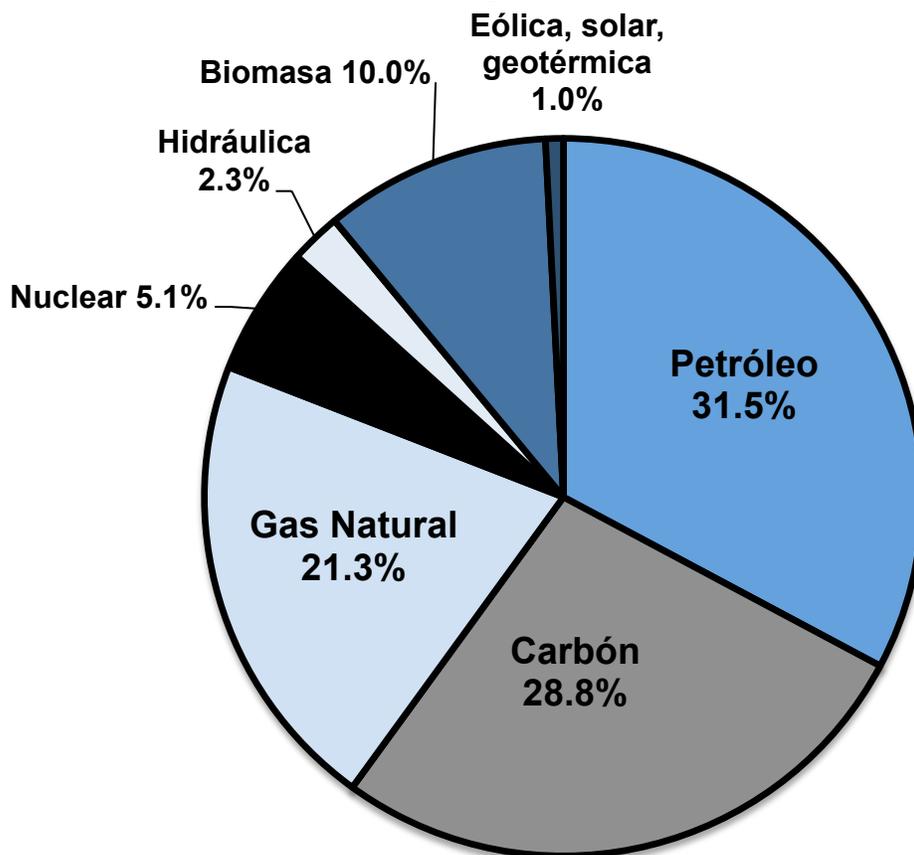
Cada etapa de desarrollo económico ha sido acompañada por una particular **transición energética** desde una fuente principal a otra. Actualmente, los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) son, con mucho, la fuente dominante de energía de las economías industriales y la principal fuente de crecimiento en la producción de energía de las economías en vías de desarrollo (ver Figura 1). Pero el siglo veintiuno ya está viendo el comienzo de la próxima gran transición de en las fuentes de energía: desde los combustibles fósiles a las fuentes de **energías renovables**. Esta transición viene motivada por varios factores, entre los que se incluye la preocupación sobre los impactos ambientales (especialmente por el **cambio climático**), los límites de las reservas de combustibles fósiles, los precios y los cambios tecnológicos.

Con el tiempo, la sociedad adoptará las energías renovables, ya que las reservas de combustibles fósiles son limitadas y sólo son generadas con el transcurso de tiempos geológicos. Por lo tanto, la pregunta no es si la sociedad adoptará las energías renovables, sino cuándo lo hará. Los tiempos de vida de los combustibles fósiles podrían ampliarse gracias a las nuevas tecnologías de extracción, pero la necesidad de minimizar los efectos nocivos del cambio climático es un problema más inmediato que el agotamiento de los combustibles fósiles. Para evitar los peores impactos derivados del aumento de las temperaturas y del cambio climático, la sociedad tiene que cambiar a las fuentes de energías renovables, aún cuando exista mucho combustible fósil enterrado en la corteza terrestre.

Este módulo se centra en las ideas básicas de la nueva economía de las energías renovables que acabarán imponiéndose: ¿qué fuentes de energía estarán disponibles y cómo se determinarán las combinaciones óptimas de fuentes de energías renovables? ¿Cómo variarán estas combinaciones de fuentes de energías renovables según su ubicación? ¿Cuáles serán los costes esperados, directos y externos, de las nuevas fuentes de energías renovables? ¿De qué manera la ubicación de las energías renovables cambiará la forma de uso de la energía en la economía? ¿Qué tipos de ajustes de ingeniería, económicos y de políticas serán necesarios para acomodar las fuentes de energías renovables, un tanto diferentes a los combustibles fósiles?

Debido a que gran parte del **capital social** y la infraestructura de los sistemas económicos modernos está basada en el uso de la energía de combustibles fósiles, cualquier transición que modifique esta dependencia, implicará una gigantesca reestructuración y nuevas inversiones. Si bien los mercados privados jugarán un papel crucial en este proceso, se necesitarán grandes cambios en las políticas gubernamentales para fomentar esta transición. Las considerables implicaciones económicas del tema justifican una atención especial sobre el uso de las energías renovables, como un asunto económico y ambiental de gran importancia.

**Figura 1. Consumo Mundial de Energía por Fuente, 2011**



Fuente: Agencia Internacional de Energía (IEA 2013)

## 2. FUENTES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

En cierto modo, las energías renovables son ilimitadas, ya que las reservas son continuamente repuestas a través de procesos naturales. Teóricamente, el suministro diario de energía solar es suficiente para satisfacer todas las necesidades humanas de energía de un año entero. Pero la energía solar y otras fuentes de energías renovables son limitadas por cuanto su disponibilidad varía en el espacio y el tiempo.

Algunas regiones del mundo son especialmente adecuadas para la energía eólica y/o solar. Por ejemplo, el potencial de energía solar es mayor en el sudoeste de los Estados Unidos, el norte de África y el Medio Oriente, y en partes de Australia y Sudamérica. Algunos de los mejores sitios para la energía eólica son el norte de Europa, el extremo sur de Sudamérica y la región de los Grandes Lagos de Estados Unidos. La energía geotérmica es abundante en países como Islandia y Filipinas. Todas las regiones del mundo tienen algún recurso de energía renovable, aunque la disponibilidad y el coste de uso son variables.

La mayor parte de la energía renovable es, en última instancia, energía solar. La energía del sol puede ser usada directamente para generar calor o electricidad. La energía hidráulica procede de las caídas de agua, originadas porque la energía solar evapora agua de niveles bajos que luego cae como lluvia en lugares más elevados. El sol también genera viento a través del calentamiento diferencial de la superficie de la tierra. La energía de la biomasa procede de la materia vegetal, originada en la fotosíntesis impulsada por el sol. Por consiguiente, la biomasa, el viento y la energía hidráulica son sólo fuentes secundarias de energía solar. Las fuentes de las energías renovables no-solar incluyen la energía geotérmica, que procede del núcleo de la tierra, en una combinación de energía sobrante del origen y la continua desintegración de materiales nucleares. La energía maremotriz es otra energía renovable no-solar, provocada por la Luna. Si bien la energía nuclear a partir de la fisión no es renovable, existe un gran debate acerca de si la energía nuclear debería formar parte del mix energético posterior a los combustibles fósiles (ver Cuadro 1).

### Energía de la Biomasa

La biomasa es cualquier combustible derivado de materia vegetal del pasado reciente, e incluye madera, cultivos, residuos de cultivos y desechos de animales. El combustible fósil también fue biomasa alguna vez, pero en tiempos remotos. La biomasa es la fuente de energía original de la humanidad, usada desde el descubrimiento del fuego. Todavía representa el 10% de los suministros mundiales de energía primaria y es la mayor fuente de energía renovable sencilla, ya que gran parte de la población mundial utiliza madera, carbón vegetal, paja o estiércol como combustible para cocinar (IEA 2012).

## Cuadro 1. Energía Nuclear: ¿Yéndose o viniendo?

Actualmente, la energía nuclear provee alrededor del 6% de la energía del mundo y el 14% de la electricidad. Las externalidades operativas de la energía nuclear son relativamente bajas, ya que el ciclo de vida de la energía nuclear genera bajos niveles de contaminación del aire y de emisiones de gases de efecto invernadero. Pero los factores externos potencialmente más significativos de la energía nuclear son los riesgos de un importante accidente y el almacenamiento a largo plazo de los desechos nucleares. Estos impactos son difíciles de valorar en términos monetarios.

El accidente de 2011 en Fukushima, en el cual tres de los seis reactores se fundieron, causando una considerable fuga de radiación y el continuo peligro de más escapes, ha hecho que muchos países reevaluaran sus planes de energía nuclear. "En Japón, la crisis nuclear más catastrófica del mundo desde el desastre de Chernobyl de 1986, tiene en vilo a otras naciones dependientes de la energía nuclear. Ciudadanos y políticos, temerosos de vivir las mismas tragedias en sus propios hogares, están instando a gobiernos de todo el mundo a repensar sus programas de energía nuclear" (The Citizen 2011).

La mayoría de las centrales nucleares del mundo datan de antes de 1990. Las centrales tienen una expectativa de vida útil de 30 a 40 años, por lo que el desmantelamiento de las más antiguas ya ha comenzado. Pero algunos destacados defensores de la acción por el cambio climático apoyan los nuevos desarrollos de la energía nuclear (Kharecha and Hansen 2013). Los futuros reactores de Generación IV son especialmente interesantes, ya que auguran varias ventajas respecto a los reactores de Generación II (≈1970-2010) y respecto a la actual tecnología de Generación III (Grimes and Nuttall 2010). Los reactores de Generación IV se apoyan principalmente en medidas pasivas de enfriado de emergencia, por lo que una pérdida inesperada de energía o un fallo en los sistemas mecánicos serían menos arriesgados. Los reactores futuros podrían, además, usar menos combustible y producir menos desechos (de vida más corta) que los reactores actuales, cuyos desechos requieren varios cientos de miles de años de almacenamiento seguro (Marques 2010).

Sin embargo, ninguna tecnología nuclear puede ser totalmente segura. Muchos de los ciclos nucleares más eficientes requieren del aislamiento del plutonio, un material extremadamente tóxico que también puede ser utilizado en armas (Butler 2004). Desde una perspectiva económica, no existen actualmente ejemplos de reactores de Generación IV en funcionamiento; por lo tanto, los costes reales de estos reactores son desconocidos.

En este módulo no ofrecemos un repaso en profundidad de la economía de la energía nuclear, ya que las características de la energía nuclear son bastante diferentes a las de las fuentes de energías renovables analizadas aquí. La economía nuclear depende en parte de los costes de los improbables e infrecuentes, aunque extremadamente costosos, accidentes, y de los supuestos sobre los costes de los desechos nucleares, en los que se podría incurrir durante milenios. La conexión entre los usos pacíficos y los usos militares de la energía nuclear es otra cuestión no-económica importante. Las herramientas económicas tienen una capacidad limitada para evaluar dichas cuestiones, algunas de las cuales corresponden, más bien, al terreno ético.

Las economías industriales pueden utilizar la energía de la biomasa de varias maneras diferentes. Existe una gran variedad de tecnologías para la utilización de la biomasa, por lo cual la bibliografía acerca de este tema puede ser confusa. En su estado más básico, la biomasa en forma de pedazos de madera, astillas o aserrín puede ser quemada. De forma similar, el pasto y los residuos de cultivos pueden ser comprimidos para formar aglomerados o bloques para ser quemados. La combustión de la biomasa puede ser usada para calentar (como en una estufa de leña), o para generar electricidad en una planta de energía, como al quemar carbón.

Los procesos químicos también pueden convertir la biomasa en combustibles como el etanol y el metanol, y algunos cultivos producen aceite vegetal, otro combustible. Además, cuando la biomasa se descompone de forma anaeróbica (sin aire), se genera gas metano, que es otro combustible potencial (el metano es  $\text{CH}_4$ , el componente principal del gas natural). Todas estas fuentes de energía se derivan de materia vegetal (biomasa). Habitualmente, la biomasa para energía es quemada, lo cual libera contaminantes del aire y, por lo tanto, constituye una **externalidad negativa** del uso de la biomasa.

Existen dos características destacadas de la economía de la biomasa. La primera, la fotosíntesis vegetal, provocada por el sol y que genera biomasa, es una manera relativamente ineficiente de recolectar energía solar; es decir, la mayor parte de la energía solar que incide en las plantas se pierde. Pimentel (2002) comparó la generación de electricidad con paneles solares fotovoltaicos (FV) con la generación de electricidad en una planta de energía alimentada con astillas de madera del bosque. Calculó cuánta superficie de tierra era necesaria para cultivar los árboles usados como combustible en la planta de energía. Por cada unidad de electricidad generada, el bosque de biomasa requería una superficie de tierra 71 veces mayor que los paneles FV (aunque la electricidad de la biomasa seguía siendo menos costosa que los paneles solares fotovoltaicos).

Esto es cierto para todas las formas de biomasa: para generar una cantidad significativa de energía de la biomasa se requieren grandes superficies de tierra. Por lo tanto, la economía de la energía de la biomasa es, en gran medida, economía de la tierra. ¿De cuánta tierra se puede disponer y a qué precio? El uso de la tierra para la producción de energía de biomasa tiene siempre un **coste de oportunidad**, dado que la misma tierra podría ser usada para producir alimentos o fibras, o para conservar la naturaleza. El efecto del uso de la energía de la biomasa a gran escala sobre la disponibilidad y sobre los precios de los alimentos supone un problema muy especial.

La segunda, y afín, característica de la biomasa es que la cantidad total de energía de la biomasa disponible es finita (si nos basamos en la disponibilidad de tierras) y pequeña en relación con el consumo actual de energía. Un estudio hecho en Massachusetts estimó que podrían producirse anualmente alrededor de 800.000 toneladas métricas secas (tms) de biomasa en bosques sostenibles; es decir, sin reducir la capacidad del bosque de seguir produciendo esta cantidad (Kelty, D'Amato and Barten 2008). Sin embargo, si toda esta biomasa fuera utilizada para producir

energía, ésta reemplazaría menos del 1% del consumo de energía de Massachusetts del año 2008. Aunque la mayor parte del estado está cubierto de masas forestales, la biomasa sola no podría suministrar la energía para los actuales niveles de consumo.

Esto también es cierto para los Estados Unidos en su totalidad, y para la mayoría de los países desarrollados. La biomasa puede proporcionar, como máximo, una pequeña porción de la energía total necesaria. Pero no hay razón para apoyarse en una sola fuente de energía renovable. Además, es probable que en una economía con energías renovables cambien los patrones actuales de consumo.

## Energía Hidráulica

La fuerza del agua es la mayor fuente de electricidad renovable del mundo y, en 2008, generó alrededor del 16% de la electricidad mundial (IEA 2010). En los casos en que las condiciones son favorables, la energía hidráulica puede ser una fuente de energía renovable de bajo costo, a menudo más económica que los combustibles fósiles. Por esa razón, la energía hidráulica ha sido extensamente desarrollada en muchas partes del mundo.

La energía hidráulica requiere lluvias y diferencias de altura en el terreno para producir energía. Las áreas húmedas y montañosas son las de mejores perspectivas para la energía hidráulica. El total de energía disponible proveniente de la energía hidráulica depende del volumen de agua disponible (**caudal**), y de su caída vertical (**altura**). Altura y caudal son substitutos para producir energía hidráulica: una cierta cantidad de energía puede obtenerse con un caudal relativamente bajo y mucha altura, o con un caudal alto y poca altura.

Los sitios óptimos para la energía hidráulica tienen una gran altura y un gran caudal (como las Cataratas del Niágara). Estos lugares generan una gran cantidad de electricidad a un coste relativamente bajo. Sin embargo, al igual que con la biomasa, el potencial energético de dichos sitios es finito. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) estima que en 2008, la producción mundial de energía hidráulica fue de 3.288 TWh, (TWh = teravatios por hora, o billón de vatios por hora, o mil millones de **kilovatios por hora**), o alrededor del 2-3% del uso mundial de energía de 2008; mientras que el potencial técnico es aproximadamente cinco veces mayor, unos 16.400 TWh, equivalentes a alrededor del 11% del uso mundial de energía de 2008. Un informe reciente del Departamento de Energía de los Estados Unidos indicó que existe un gran potencial de desarrollo adicional para la energía hidráulica en los Estados Unidos sin la necesidad de construir nuevas presas, simplemente desarrollando instalaciones de generación eléctrica en embalses existentes (DOE 2012a).

La dimensión del desarrollo hidráulico varía enormemente según el país. Por ejemplo, Suiza ha desarrollado el 88% de su potencial técnico estimado; México ha desarrollado el 80%, y Noruega el 70%. Se cree que China ha desarrollado sólo el 24% de su potencial técnico y los Estados Unidos el 16% (IEA 2010). En los lugares donde la energía hidráulica cuenta con una amplia tradición, muchos de los mejores sitios ya

han sido aprovechados, y los aprovechamientos adicionales implicarían mayores costes. No obstante, en un mundo con energías renovables, los precios de la energía podrían elevarse, lo cual haría que más enclaves fueran viables para el aprovechamiento hidráulico.

La otra cuestión importante de la economía de la energía hidráulica se refiere a los costes externos, especialmente aquellos imputables a la construcción de represas. Las represas hidroeléctricas tienen dos funciones: crear una caída o salto vertical sobre una corta distancia horizontal y almacenar agua para permitir mayores caudales en tiempos de gran demanda de electricidad. Los embalses de agua ocupan valiosas tierras y alteran de forma radical los ecosistemas fluviales naturales, cambiando los hábitats y el abastecimiento de otros **servicios del ecosistema** (ver Cuadro 2 acerca de la instalación hidroeléctrica más grande del mundo en China). En Nueva Inglaterra, por ejemplo, las poblaciones nativas de salmón y sábalo fueron parcialmente reducidas por el bloqueo de las represas a las rutas de migración que los peces utilizaban durante el desove.

Las externalidades ambientales de la energía hidroeléctrica pueden ser mitigadas, pero esto supone costes. Algunas centrales hidroeléctricas no tienen represas. El agua únicamente es canalizada desde un nivel elevado a otro inferior. Sin embargo, esta opción puede resultar más cara que la construcción de una presa, especialmente si hay una larga distancia horizontal desde el punto alto hasta el bajo. Generar hidroelectricidad sin una represa también significa renunciar al almacenamiento de agua, un valioso recurso para equilibrar la oferta y la demanda de energía (analizado más abajo). También pueden establecerse alteraciones mínimas y máximas al caudal natural de un río, de manera que el ecosistema de un río se mantenga dentro de los límites naturales de su caudal. Pero esto probablemente significaría renunciar ocasionalmente a la producción de energía, aumentando los costes de la generación de electricidad.

Si bien la **energía maremotriz (energía de las mareas)** es, en realidad, generada por la actividad lunar más que por la solar, los fundamentos físicos son similares a los de la energía hidráulica. Al igual que con la energía hidráulica, la energía es generada por medio de una combinación de altura y caudal de agua, y los mejores emplazamientos son aquellos con una gran altura y un gran caudal. Una manera de aprovechar la energía maremotriz es construyendo un dique que atraviese la boca de una ensenada. El agua puede fluir en ambas direcciones, cuando la marea sube y cuando baja, y la energía es generada por el caudal en ambas direcciones. La altura cambia constantemente con las mareas, desde la máxima diferencia de nivel entre marea alta y baja hasta cero.

En comparación con la mayoría de los escenarios de energía hidráulica, la altura promedio de las mareas es bastante baja, lo cual implica costes más altos. Además, construir diques y plantas generadoras en un entorno marino es más problemático y costoso que en un entorno de agua dulce. En los estuarios de los ríos existe, también, una gran probabilidad de externalidades ambientales, ya que la desembocadura de los ríos constituye uno de los lugares biológicamente más ricos del mundo. Aún así, en

algunos sitios, la energía de las mareas puede tener potencial como una fuente significativa y fiable de energía renovable.

## **Cuadro 2: Energía Hidráulica en China: la Presa de las Tres Gargantas**

El mundo cuenta con alrededor de 45.000 presas de más de 15 metros de altura y 22.000, casi la mitad de ellas, se encuentran en China (en contraste con sólo 6.390 represas de este tamaño en los Estados Unidos). Por lo tanto, China ya era el mayor constructor de presas del mundo incluso antes de presa de las Tres Gargantas (Wu et al. 2004). La construcción de una represa en el Río Yangtzé, en la región de las Tres Gargantas, en el centro-sur de China, fue propuesta por primera vez en los años 30, con el objetivo de controlar los devastadores desbordamientos del río. A modo de ejemplo, un desbordamiento del Río Yangtzé en 1931 mató al menos a 145.000 personas (Stone 2008). El proyecto fue recuperado en 1984 por el Primer Ministro Li Peng (ingeniero hidráulico de formación). Después de un largo período de evaluación, la construcción comenzó en 2003, y en 2006 se llenó el embalse y comenzó la producción de energía.

La superficie total inundada por las aguas de la Presa de las Tres Gargantas es de 1080 km<sup>2</sup>, con un embalse que tiene una anchura promedio de 1,1 km; esto es, un embalse muy largo y angosto (Wu et al. 2004). La estación generadora tiene una capacidad de 18,2 gigavatios (la más grande del mundo) y se espera que produzca 85 mil millones de kW/h de electricidad por año (Acker 2009).

Hubo muchas preocupaciones sociales y ecológicas acerca de la construcción de la Presa de las Tres Gargantas. Se calcula que 1,13 millones de personas fueron desplazadas debido a que sus comunidades fueron destruidas por la elevación de las aguas (Acker 2009), y también se perdieron muchas tierras de cultivo. La región de las Tres Gargantas tiene una enorme biodiversidad, con muchas especies raras y en peligro de extinción, varias de las cuales son endémicas de la región (Wu et al. 2004). El nuevo embalse disminuye el hábitat total para estas especies y, al mismo tiempo, fragmenta gran parte del hábitat restante. Algunas especies están confinadas a nuevas islas creadas dentro del embalse. Debido al aislamiento de dichas especies en nuevos lugares, se espera que haya diversas extinciones, aunque es difícil calcular los efectos con precisión (Wu et al. 2004).

Aunque es más grande y más profunda que la mayoría de los proyectos hidráulicos, la Presa de las Tres Gargantas simboliza el dilema que plantean los aprovechamientos hidráulicos adicionales en general. La pérdida de tierras para ejecutar presas es costoso, dañino para el medio ambiente y potencialmente injusto para los afectados. Sin embargo, se puede producir una gran cantidad de electricidad a un bajo coste, y sin emisiones de dióxido de carbono derivados de la quema de combustibles fósiles. El uso de carbón para producir la misma cantidad de electricidad suministrada por la Presa de las Tres Gargantas supondría alrededor de 50 millones de toneladas de carbón por año (Stone 2008).

## Energía eólica

Al igual que la biomasa y la energía hidráulica, **la energía eólica** ha sido usada desde la antigüedad. En los lugares más favorables, la producción moderna de electricidad a partir del viento está muy cerca del coste de otras fuentes, como el carbón y la energía nuclear. Sin embargo, existe una gran diferencia entre el coste de la energía eólica en los sitios idóneos y en los menos adecuados.

La energía eólica es generada por la energía del aire en movimiento. La energía disponible varía según la velocidad del viento elevada al cubo. Duplicar la velocidad del viento da lugar a  $(2 \times 2 \times 2)$  8 veces más energía potencial; triplicar la velocidad del viento da como resultado  $(3 \times 3 \times 3)$  27 veces más energía. Generalmente, más energía potencial significa un menor coste para una cantidad específica de energía. Los sitios más ventosos son, por lo tanto, más adecuados que los menos ventosos. Generalmente, estas ubicaciones se encuentran en las costas y en el agua; a lo largo de las cadenas montañosas, y en amplias áreas abiertas, como las Grandes Llanuras de los Estados Unidos.

Al igual que ocurre con la biomasa y la energía hidráulica, el potencial de la energía eólica en la mayoría de las regiones es finito y está limitado por el número de emplazamientos en los que la fuente de energía puede ser desarrollada con un coste razonable. Pero, si fuera viable trasladar largas distancias la energía producida, una región como las Grandes Llanuras de los Estados Unidos teóricamente podría suministrar una gran parte de la energía de los Estados Unidos.

No solo la energía eólica promedio varía enormemente según el lugar, sino que la energía disponible en un momento concreto también varía mucho según la velocidad del viento. Hay más energía disponible en los días ventosos que en los días tranquilos. Esta **intermitencia** es común a la mayoría de las fuentes de energías renovables, pero en el caso del viento representa un reto especial, dado el grado de variación de la energía potencial en función de la velocidad del mismo.

El **coeficiente de capacidad** de una central de energía se define como la relación entre la energía real producida y el máximo potencial de producción energética. Las centrales nucleares y de carbón tienen, en general, coeficientes de capacidad muy altos, a veces por encima del 90%, lo cual significa que, durante un año, pueden producir más del 90% de la energía que obtendrían si funcionaran continuamente al máximo rendimiento durante todo el año. En contraste, el coeficiente de capacidad de energía eólica en un lugar idóneo podría ser del 30%, con coeficientes mucho más bajos en lugares con poco viento. A pesar de que la energía eólica algunas veces es criticada debido a que su coeficiente de capacidad es intrínsecamente bajo, esto sólo es un problema en la medida en que esté relacionado con el coste.

Como todas las fuentes de energía, la energía eólica tiene sus propias externalidades. Las que más preocupan son el impacto estético de los molinos de viento, que comúnmente sobrepasan 400' (10,16 m) de altura; el ruido del viento en las

aspas de la turbina, que puede suponer un problema en las proximidades de los aerogeneradores, y la mortalidad de las aves debido a la colisión con las aspas.

El ruido y la mortalidad de las aves pueden ser mitigados con una ubicación adecuada de las instalaciones eólicas; si bien la energía eólica no es del todo flexible en cuanto a su ubicación, dado que necesita las localizaciones más ventosas. El impacto estético no es fácil de mitigar, ya que la energía eólica requiere de grandes estructuras que no son fáciles de esconder. Sin embargo, la belleza es subjetiva y algunos creemos que los molinos de viento son atractivos, en parte porque representan la transición hacia la energía renovable. La energía eólica marina es un recurso de energía renovable que, potencialmente, tiene menos externalidades negativas que los desarrollos en tierra (ver Cuadro 3).

La energía undimotriz (de las olas) puede considerarse una fuente secundaria de energía eólica, ya que el viento genera las olas. Las estrategias para aprovechar la energía undimotriz incluyen dispositivos flotantes que suben y bajan con las olas y que, a su vez, generan energía mecánica que finalmente es convertida en electricidad. Aunque existen muchos diseños teóricos para aprovechar la energía undimotriz, existen pocos ejemplos a gran escala en funcionamiento. El coste es, otra vez, el problema: si bien se puede obtener energía de las olas, es costoso convertirla en energía útil para la sociedad.

### **Cuadro 3: Energía Eólica Marina en Massachusetts: Cape Wind**

Hasta la fecha, la mayoría de los desarrollos de energía eólica han sido sobre tierra, pero la energía eólica marina tiene diversas ventajas. Los vientos marinos son más fuertes y más constantes que los de tierra adentro. Una mayor consistencia del viento aumenta el coeficiente de capacidad de la energía eólica y reduce la necesidad de almacenamiento de energía. Además, la potencial capacidad del viento marino es enorme: según la Administración de Información de la Energía de Estados Unidos (EIA), la capacidad de la energía eólica de la costa y de los Grandes Lagos de los Estados Unidos es de 4,15 TW; esto es, cuatro veces el total de la capacidad de generación eléctrica de los Estados Unidos en 2009 (EIA 2012).

Además de tener acceso a más energía eólica, las instalaciones marinas no compiten con otros usos de la tierra como lo hacen los emplazamientos de generación tierra adentro. En el agua no hay vecinos a los que moleste el ruido de los molinos de viento y las instalaciones que están lo suficientemente lejos de la costa pueden ser invisibles para quienes viven en ésta. Por último, los aerogeneradores de instalaciones marinas pueden ser más grandes que los del interior, ya que los componentes más grandes pueden ser trasladados más fácilmente por agua.

Desarrollar energía eólica marina es también más costoso que desarrollarla en tierra. Anclar las torres al lecho marino implica un gasto significativo, que aumenta según la profundidad del agua. La infraestructura del tendido debe desplegarse debajo del agua para recoger la energía generada por los aerogeneradores marinos. El mantenimiento también es más costoso en el agua, así como la construcción de turbinas capaces de aguantar el severo entorno del mar. (Snyder and Kaiser 2009).

La primera central eólica marina propuesta en los Estados Unidos fue Cape Wind, frente a la costa de Cape Cod, en Massachusetts. El proyecto fue planteado inicialmente en 2001 y recibió los permisos definitivos en 2011, después de un largo proceso. Sin embargo, en 2014 la construcción aún no había comenzado. Los permisos del proyecto permiten la instalación de 130 aerogeneradores con una altura máxima de 440' (11,17 m) y una capacidad de 3,6 MW cada uno; esto es, un total de 468 MW de capacidad instalada. La producción de electricidad proyectada suministraría el 75% de la electricidad de Cape Cod y las islas cercanas.

Desde su origen, el proyecto de Cape Wind ha sido extremadamente polémico. Los opositores al proyecto temen que se produzca un daño a los privilegiados paisajes, ya que a 5,6 millas mar adentro (en el punto más cercano), las turbinas serían ligeramente visibles desde la costa. También podría afectar a los valores inmobiliarios, a la vida marina y aviar, y a la navegación. La duración del proceso de obtención de permisos de más de 10 años refleja tanto la fuerte oposición al proyecto como la falta de claridad jurisdiccional por parte del gobierno para el nuevo recurso eólico marino. Las apelaciones legales aún estaban en trámite en 2014.

En 2012, Cape Wind firmó un acuerdo con National Grid para la venta de electricidad, comenzando a \$0,187/kWh (Ailworth 2012), un precio considerablemente más alto que las tarifas de mercado de la electricidad en Massachusetts, y más del doble el precio de la energía eólica obtenida tierra adentro, lo cual generó aun más polémica. No obstante, el éxito de Cape Wind sería un paso importante en el desarrollo de la que finalmente puede ser una de las mayores fuentes de energías renovables de los Estados Unidos. En Europa, la energía eólica marina está mucho más desarrollada, con 64 centrales eólicas marinas en funcionamiento en 2014.

## Energía Solar

La energía solar aparece en tres formas básicas: 1) energía solar térmica de baja temperatura (solar térmica), 2) eléctrica solar o fotovoltaica (FV), y 3) energía solar térmica de alta temperatura (solar termoeléctrica).

El aprovechamiento solar térmico incluye el calentamiento solar de agua y de espacios (calefacción). La luz del sol incide sobre alguna superficie, generalmente negra para lograr una mayor absorción, la cual, a su vez, calienta aire o agua. Una capa protectora vidriada ayuda a retener el calor capturado. El calor solar puede ser almacenado en materiales de gran masa como agua o piedra. La energía solar de baja temperatura generalmente utiliza tecnologías simples y probadas.

El calentamiento solar de agua ya es financieramente competitivo con los combustibles fósiles en muchos climas. Los sistemas de calefacción solar también son posibles, pero uno de sus retos económicos es que la oferta y la demanda mensuales son casi exactamente opuestas: la mayor demanda se produce en invierno, cuando hay menos sol; mientras que cuando hay más sol, en verano, la demanda de energía para calefacción es la más baja. En la práctica, esto significa que los sistemas de calefacción solar casi siempre requieren de alguna fuente suplementaria de calentamiento, ya que el coste marginal de obtener energía solar en medio del invierno es enormemente alto. La calefacción complementaria supone un coste adicional a los sistemas de calefacción solar.

La energía solar también puede ser usada para producir electricidad en vez de calor. Los paneles **fotovoltaicos (FV)** emplean material semiconductor para generar un flujo de electricidad cuando son alcanzados por la luz del sol. Aunque actualmente esta tecnología está bien desarrollada y es fiable, también es costosa en comparación con las actuales fuentes de energía: probablemente tres veces el coste de la electricidad generada por combustibles fósiles, dependiendo de las circunstancias específicas de la comparación. Los costes de la energía solar FV han bajado considerablemente y se estima que bajarán aun más. Una cuestión importante, discutida más abajo, es si los costes de este tipo de energía alcanzarán un nivel totalmente competitivo y cuándo lo harán.

En contraste con otras fuentes de energía renovable, la energía solar FV se consigue de forma sostenible en cantidades casi infinitas y casi en cualquier lugar. En los Estados Unidos, los datos del Laboratorio Nacional de Energías Renovables muestran la media anual de kWh solares fotovoltaicos disponibles por día en todas las ubicaciones de los Estados Unidos. La energía disponible oscila entre unos 6,0 kWh por día por m<sup>2</sup> de panel FV en la mayor parte de Nueva México y Arizona; unos 4,0 kWh por día en Nueva Inglaterra; y tan sólo 3,5 kWh por día en las costas de Oregón y Washington (NREL 2008). Aunque estas diferencias de disponibilidad se trasladan a los costes, la energía solar FV puede ser usada casi en todos lados (con la posible excepción de las latitudes del extremo norte y el extremo sur). Por ejemplo, aunque no

está entre los sitios más soleados del mundo, Alemania ha sido siempre un líder en lo que respecta a capacidad fotovoltaica instalada.

El espacio requerido para la energía solar FV es significativo. Las células solares suelen ser montadas en paneles modulares, los cuales son instalados en matrices que pueden ser montadas en el suelo, en un poste o en un techo. Estas matrices tienen tamaños variables, desde unos pocos paneles sobre un techo hasta un techo hecho totalmente de paneles solares, pasando por terrenos de muchas hectáreas cubiertas por paneles. Para suministrar electricidad a una gran parte de la sociedad a partir de energía solar FV, haría falta una cantidad de espacio considerable, aunque esto no sería un obstáculo insalvable (ver Cuadro 4). Además, la energía solar FV no es la única fuente de energía renovable y, en una economía de energías renovables, el uso de la energía podría disminuir (como se analiza a continuación).

La energía solar de alta temperatura (energía termoeléctrica) es otro medio para generar electricidad o para suministrar calor para aplicaciones industriales. En una instalación típica, los rayos solares son concentrados en un colector de espejo. La luz solar concentrada es dirigida hacia un punto en el que la energía es absorbida y pasada a un medio transmisor como el aceite. Después, el aceite de alta temperatura produce vapor que genera electricidad en turbinas convencionales. Si bien dichos sistemas son más complejos que los paneles solares FV, con muchas partes móviles, en gran escala pueden producir electricidad de manera menos costosa que la energía FV en algunos sitios (como se indica en la Figura 2, abajo). España ha sido un líder mundial en la energía FV concentrada, con una capacidad instalada de más de 2.000 megavatios en 2014. Pero, dado que los sistemas eléctricos solares concentrados aún no están muy extendidos, los costes a largo plazo no son bien conocidos y las estimaciones de costes futuros varían ampliamente.

#### **Cuadro 4: Huellas de la Electricidad Solar**

Si bien la cantidad total de energía solar que llega a la Tierra cada día desde el sol es enorme, la cantidad de energía disponible en cualquier punto específico es modesta. La cantidad de energía extraída de los paneles solares depende del nivel solar ambiental y de la eficiencia de conversión del colector de energía. El ángulo en que los colectores son instalados también afecta a la producción de energía y a los requisitos de espacio: los paneles colocados perpendicularmente a los rayos solares obtienen mayor energía, pero necesitan espacio entre ellos para evitar hacerse sombra; mientras que los paneles colocados horizontalmente recogen menos energía por panel, pero requieren menos espacio.

Dado que el suministro de energía solar no siempre encuentra demanda, parte de la energía solar podría necesitar ser almacenada (analizado abajo); y dado que el almacenamiento no es eficiente al 100%, el requerimiento total de generación de electricidad solar podría ser mayor que la demanda final de electricidad.

En una investigación se analizó cuáles serían los requerimientos de espacio para proveer de electricidad al tendido eléctrico de los Estados Unidos exclusivamente con energía solar (Denholm and Margolis 2008). Aunque este escenario es poco probable incluso en una economía de energía al 100% renovable, nos da una idea de las necesidades de espacio para un suministro eléctrico con un gran componente solar. De acuerdo con los niveles actuales de eficiencia en los paneles solares, los autores descubrieron que la cobertura solar promedio de los Estados Unidos sería de unos 181 m<sup>2</sup> per capita; esto es, una superficie de 44 pies cuadrados (4,08 m<sup>2</sup>) por cada persona de los Estados Unidos. Este valor varía según la ubicación, el ángulo de instalación de los paneles y los supuestos sobre la ubicación del uso industrial de la electricidad: gran parte de la electricidad usada en la creación de productos manufacturados representa energía incorporada que es trasladada por los Estados Unidos (y el mundo).

A nivel nacional, generar el 100% de la electricidad con energía solar FV requeriría de una superficie de alrededor de 235 km cuadrados (146 millas), en función, de nuevo, de dónde estén localizados los paneles. Esto es el 0,6% del territorio de los Estados Unidos. A nivel estatal (si cada estado produjera su propia electricidad exclusivamente a partir de paneles FV), el porcentaje de superficie terrestre necesaria oscilaría entre 0,04% en Wyoming y 8,8% en Nueva Jersey. Para Nueva Jersey, esto representa aproximadamente dos veces la superficie actual de carreteras estatales y tejados. Por supuesto que los estados no necesitan ser auto-suficientes en términos de electricidad, y no toda la energía renovable se obtendrá de la energía solar FV. No obstante, la huella de la electricidad solar se hará notar.

## Energía Geotérmica

Al igual que “biomasa” y “solar”, el término “**geotérmica**” se refiere, en realidad, a varias tecnologías diferentes, distinguidas primordialmente, por la temperatura del recurso geotérmico. La temperatura de la Tierra aumenta de forma continua con la profundidad, de hecho el núcleo de la tierra está fundido. Las cuestiones esenciales para la utilización de la energía geotérmica son cuán alta es la temperatura, a qué profundidad está y con qué facilidad puede ser extraído ese calor.

En las formas más puras y más económicas de uso de la energía geotérmica, se encuentran temperaturas lo suficientemente altas como para hervir agua cerca de la superficie de la tierra. Esto ocurre en sitios como Filipinas e Islandia, así como en otros países que se encuentran cerca de los bordes de las placas tectónicas. En dichos lugares, pozos relativamente poco profundos pueden producir vapor con presión y temperatura lo suficientemente altas como para generar electricidad en turbinas de vapor. Si bien existe una serie de costes relacionados con el manejo del vapor natural (por ejemplo, una variedad de químicos no deseados en el vapor), la energía geotérmica tiene un costo relativamente bajo y, a diferencia de otras fuentes de energías renovables analizadas aquí, tiene la ventaja de poder operar continuamente. Sin embargo, esta posibilidad está limitada a las áreas sísmicamente activas. Las centrales de energía de ciclo binario se apoyan en la ebullición de un líquido no-acuoso como el amoníaco, operando a temperaturas más bajas que las turbinas de vapor, y utilizable en muchas más localizaciones.

En el siguiente nivel de la escala térmica, algunas áreas tienen agua geotérmica que es demasiado fría para generar electricidad pero lo suficientemente caliente para calentar ambientes. Nuevamente, esto es común en Islandia, donde cerca del 90% del espacio construido es calentado por agua geotérmica (Eggertsson et al. 2010). Las áreas con agua geotérmica de temperatura suficiente para calefacción son más comunes que las áreas con vapor para generar electricidad, aunque sean relativamente inusuales en el mundo. Por supuesto que podría encontrarse agua caliente en un pozo lo suficientemente profundo en cualquier lugar de la Tierra (dado que el núcleo de la Tierra está derretido), pero dichos pozos deberían ser extremadamente profundos en la mayoría de los lugares, y el coste de cavar esos pozos haría que esta energía fuera muy cara.

El término “geotérmico” puede aplicarse también a un sistema que utilice **bombas de calor** de agua subterránea. En dichos sistemas, el agua circula a través del suelo a temperaturas que son demasiado bajas para calentar los edificios directamente, normalmente alrededor de 50° F. Pero aún hay energía en el agua a 50° F, y las bombas de calor utilizan tecnología de refrigeración para concentrar este calor y elevarlo a una temperatura utilizable para la calefacción de un edificio (por ejemplo, 120° F). Las bombas de calor necesitan electricidad para hacer funcionar sus motores, pero la producción de calor es hasta cinco veces mayor que el consumo de energía eléctrica. Por lo tanto, pese a que el calor viene técnicamente de la tierra, es más

exacto considerar las bombas de calor de agua subterránea como una forma muy eficiente de usar electricidad para calefacción.

## Disponibilidad de la Energía Renovable

Un estudio reciente concluyó que las fuentes de energías renovables, basadas en el viento, el agua y el sol (WWS, en inglés; sin incluir la biomasa), podrían suministrar el total de la nueva energía de todo el mundo en 2030 y reemplazar a todas las actuales fuentes de energía no-renovables en 2050 (Jacobson and Delucchi 2011, p. 1154). La Tabla 1 muestra estimaciones de la energía potencial de varias fuentes de energías renovables, convertida a billones de vatios.

La demanda de energía prevista para 2030 es de 17 billones de vatios. Así vemos en la Tabla 1 que la disponibilidad de energía a partir del viento y el sol en ubicaciones con probabilidad de ejecución es más que suficiente para satisfacer las necesidades de energía de todo el mundo. El análisis de los autores imagina:

“...un mundo enteramente alimentado por WWS, sin quemar combustibles fósiles ni biomasa. Hemos asumido que todos los usos finales susceptibles de ser electrificados usan energía de WWS directamente y que los usos finales restantes utilizan energía de WWS de forma indirecta en la forma de hidrógeno electrolítico (hidrógeno producido por la fisión del agua con energía de WWS). El hidrógeno sería producido utilizando energía de WWS para fisiónar el agua; por lo tanto, directa o indirectamente, la energía de WWS alimenta al mundo”.

**Tabla 1. Disponibilidad de Energía Renovable Global**

<b>Fuente de Energía</b>	<b>Disponibilidad Global Total (billones de vatios)</b>	<b>Disponibilidad en Ubicaciones Desarrollables (billones de vatios)</b>
Eólica	1700	40 – 85
Undimotriz (olas)	> 2,7	0,5
Geotérmica	45	0,07 – 0,14
Hidroeléctrica	1,9	1,6
Maremotriz	3,7	0,02
Solar fotovoltaica	6500	340
Energía solar concentrada	4600	240

Fuente: Jacobson y Delucchi (2011)

A continuación los autores calculan la infraestructura que sería necesaria para proveer toda la energía mundial a partir de WWS en 2030. La Tabla 2 presenta sus resultados, basados en la suposición de que el 90% de la energía global esté suministrada por el viento y sol, y el 10% por otras fuentes renovables.

También consideraron las necesidades de territorio para la infraestructura de la energía renovable, incluyendo el territorio para tener un espacio adecuado entre los molinos de viento. Las necesidades totales de tierra llegaron aproximadamente al 2% de la superficie total de la Tierra, fundamentalmente por espacio entre aerogeneradores que podría usarse para agricultura, pastoreo o espacio abierto. Además, los molinos de viento podrían ubicarse mar adentro, para reducir las necesidades de tierra.

**Tabla 2. Necesidades de Infraestructura para el suministro de toda la Energía Mundial en 2030 a partir de Fuentes Renovables**

Fuente de Energía	Porcentaje de Suministro de Energía Global en 2030	Número de Centrales/Equipos necesarios en todo el mundo
Molinos de viento	50	3.800.000
Centrales de energía undimotriz (olas)	1	720.000
Centrales geotérmicas	4	5350
Centrales hidroeléctricas	4	900
Turbinas maremotrices	1	490.000
Sistemas solares FV de tejado	6	1700 millones
Centrales de energía solar FV	14	40.000
Centrales de energía solar concentrada	20	49.000
TOTAL	100	

Fuente: Jacobson y Delucchi (2011)

La tecnología para implementar estas fuentes de energías renovables ya existe, y mientras la energía renovable del mundo se encuentra disponible en cantidades suficientes, el problema de los costes es primordial para comprender con qué rapidez se producirá una transición energética. Los costes incluyen tanto la inversión en la infraestructura energética como el funcionamiento diario. Al analizar los costes, deberíamos considerar tanto los costes de mercado del suministro como los costes ambientales de diferentes fuentes de energía. Éste es el análisis que haremos a continuación.

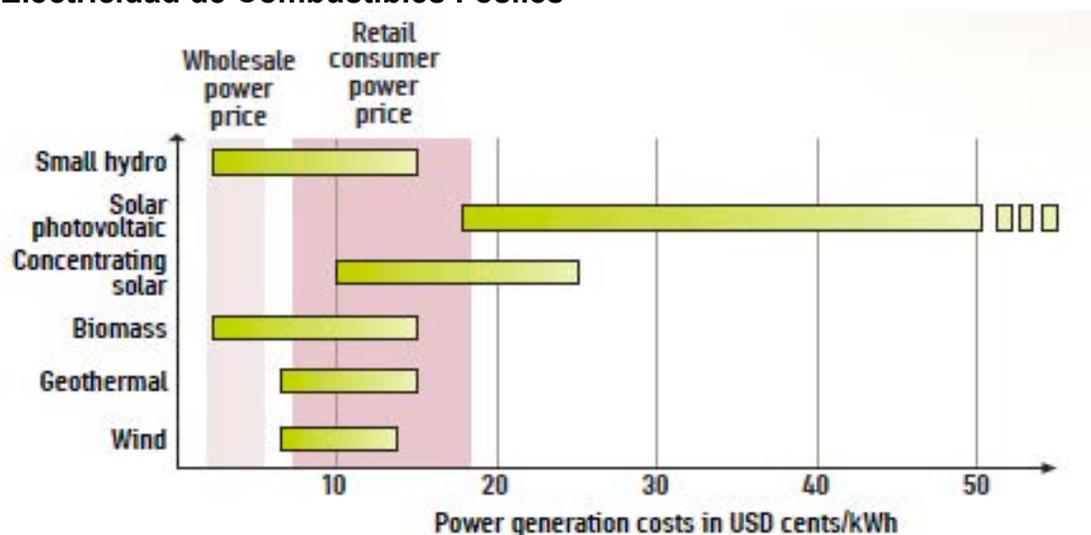
### 3. ECONOMÍA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El mundo actualmente obtiene el 80% de su suministro de energía de los combustibles fósiles, ya que estas fuentes, en general, ofrecen energía al más bajo coste. Sin embargo, la ventaja en coste de los combustibles fósiles sobre las fuentes de energía renovable ha ido reduciéndose en los últimos años y algunas energías renovables ya pueden competir con los combustibles fósiles en términos financieros. Se espera que los costes de las energías renovables bajen más en el futuro, mientras los precios de los combustibles fósiles probablemente subirán. Por lo tanto, aun sin políticas para promover una transición hacia las renovables, los factores económicos ya nos están empujando en esa dirección.

Las comparaciones de los costes entre diferentes fuentes de energía se realizan calculando el **coste normalizado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés)**. Los costes normalizados representan el **valor actual** de construcción y funcionamiento de una central durante su vida útil, expresado en términos reales para evitar el efecto de la inflación. Para las fuentes de energía que requieren combustible, las suposiciones son hechas de acuerdo a los costes futuros del combustible. Los costes normalizados de construcción y funcionamiento son posteriormente divididos por el total de energía obtenida para permitir comparaciones directas entre diferentes fuentes de energía.

La Figura 2 compara el coste de las energías renovables con los costes de la electricidad tradicional de combustibles fósiles. Para que las renovables sean competitivas en costes, éstos normalmente deberían bajar hasta el precio mayorista de la electricidad; es decir, hasta el precio al que las centrales de energía de combustibles fósiles venden la electricidad a la red. Esto ya ha ocurrido para algunas renovables, como la energía hidráulica y la biomasa. La Figura 2 indica que la energía eólica y la geotérmica son prácticamente competitivas en precio con las fuentes tradicionales de energía. La energía solar es más costosa, pero como los paneles fotovoltaicos pueden ser instalados por consumidores individuales, el precio de los mismos sólo necesita bajar hasta el precio minorista de energía que los consumidores pagan, el cual es mayor que el precio mayorista.

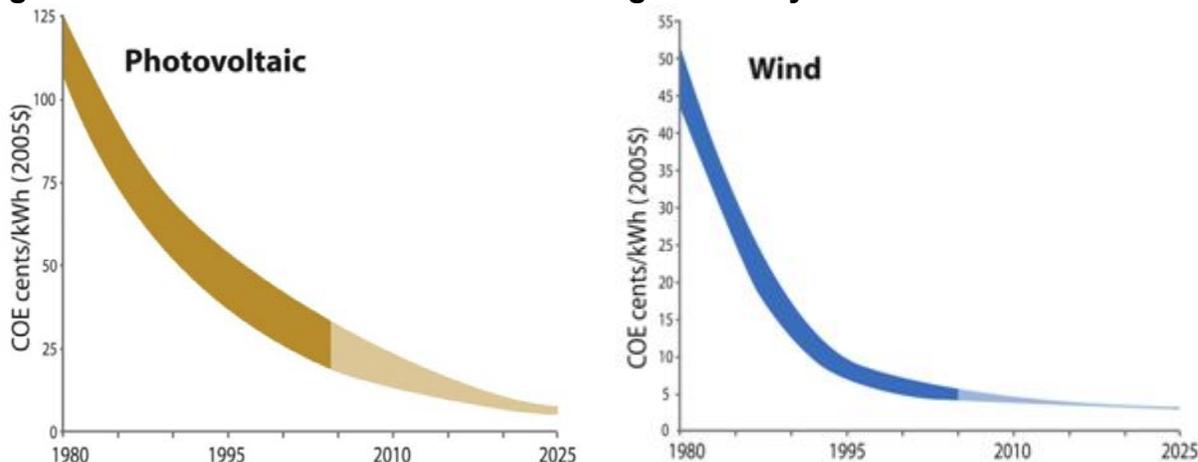
**Figura 2. Comparación de Costes entre Fuentes de Energías Renovables y Electricidad de Combustibles Fósiles**



Fuente: Agencia Internacional de la Energía y Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (IEA 2007)

La Figura 3 muestra las tendencias de costes pasados y previstos para las energías eólica y solar. Si bien son probables las caídas futuras en los costes, la curva de costes sugiere que los costes futuros disminuirán más lentamente que en el pasado. Además de bajar sus costes, la Figura 3 también sugiere que se reducirá la fluctuación de los costes de la energía fotovoltaica y eólica. Por lo tanto, se espera que los precios futuros de las energías renovables sean más predecibles, a diferencia de los combustibles fósiles. Según un informe del Departamento de Energía de los Estados Unidos, los precios de los sistemas FV, ya instalados, de los Estados Unidos cayeron entre un 5% y un 7% en promedio por año de 1998 a 2011; y entre un 11% y un 14% de 2010 a 2011; y aún se esperan más caídas en los precios (DOE 2012).

**Figura 3. Reducción de costes de las Energías Solar y Eólica**



Fuente: National Renewable Energy Laboratories (2005)

Mientras los costes de las energías renovables disminuyen, los futuros precios de mercado para las energías renovables no serán necesariamente menores que los precios históricos del combustible fósil. Los desafíos a los que se enfrentan los costes de producción de energías renovables incluyen la energía neta de las renovables, su intermitencia y su intensidad de capital.

## Energía Neta

Los combustibles fósiles que componen la mayor parte de nuestra cartera actual de energías representan grupos de energía muy concentrados. Por ejemplo, un galón de gasolina contiene alrededor de 37 kWh (kilovatios por hora) de energía potencial. Una persona promedio quema alrededor de 0,13 kWh si corre durante una hora (Haymes and Byrnes 1993). Por lo tanto, una persona debería correr 285 horas o casi 12 días seguidos para gastar la cantidad de energía potencial que hay en apenas un galón de gasolina. Un típico panel solar FV de 3' x 6' puede generar alrededor de 0,2 kWh en una hora de un día soleado. El sol debería brillar sobre dicho panel durante 185 horas (alrededor de un mes, suponiendo seis horas de sol brillante por día) para generar la misma energía que un galón de gasolina. La razón por la cual la gasolina y otras fuentes actuales de combustible fósil son tan usadas es que tienen grandes cantidades de energía concentrada convenientemente, accesible de inmediato para su uso.

Se requiere energía para obtener energía, pero en el pasado no hacía falta tanta como ahora. Por ejemplo, los primeros depósitos de petróleo fueron hallados cerca de la superficie, por lo cual no era necesario profundizar ni bombear el petróleo desde una gran distancia vertical. A medida que fue pasando el tiempo, la energía requerida para encontrar, extraer y procesar el crudo fue aumentando. Este costo en energía para obtener el petróleo debería ser deducido de la energía obtenida para así reflejar la energía neta disponible.

Normalmente la energía neta se expresa como una relación (ratio) entre la energía disponible para consumo final y la energía requerida para producirla. (Otra expresión para "energía neta" es "rentabilidad energética de la (energía) invertida", EROI, según sus siglas en inglés. Ver Cleveland 1991). Una gran **ratio de energía neta** significa que obtenemos mucha energía útil con una pequeña inversión de energía, como sucedía con los depósitos originales de petróleo. La Tabla 3 muestra las relaciones de energía neta para varias fuentes de energía. Estas proporciones pueden variar significativamente para una misma fuente, dependiendo de la tecnología y de las condiciones de producción, como muestran las diferencias en las ratios calculadas para varias formas de energía de biomasa (Tabla 3, últimas cuatro filas).

**Tabla 3. Ratios de Energía Neta para Varias Fuentes de Energía**

Fuente de Energía	Ratio de Energía Neta	Referencia
Petróleo (global)	35	(Yandle, Bhattarai and Vijayaraghavan 2004)
Gas natural	10	(Hall 2008)
Carbón	80	(Cleveland 2005)
Petróleo de pizarra bituminosa (Shale oil)	5	(Hall 2008)
Nuclear	5-15	(Lenzen 2008; Murphy and Hall 2010)
Hidráulica	>100	(Hall 2008)
Eólica	18	(Kubiszewski, Cleveland and Endres 2010)
Células Fotovoltaicas	6,8	(Battisti and Corrado 2005)
Etanol (caña de azúcar)	0,8 – 10	(Hall, Cleveland and Kaufmann 1986),(Goldemberg 2007)
Etanol (base de maíz)	0,8 – 1,6	(Farrell, Pelvin and Turner 2006)
Biodiesel	1,3	(Hall, Cleveland and Kaufmann 1986)
Astillas de sauce de cultivo	55	(Keoleian and Volk 2005)

Adaptado de Murphy y Hall (2010)

La energía neta es un atributo físico de cada fuente de energía y un componente del coste. Por ejemplo, si una mejor tecnología reduce la energía requerida para construir un panel solar, el coste del panel caerá, y el coste de la electricidad fotovoltaica producida también disminuirá. Como muestra la Tabla 3, las fuentes de energías renovables generalmente tienen bajas ratios de energía neta, al menos en comparación con los combustibles fósiles históricos como el petróleo y el carbón. Aunque existe una gran cantidad de radiación solar sobre la Tierra todos los días, ésta se disipa por toda la superficie terrestre y recolectar esa energía dispersa es costoso.

### **Intermitencia**

Por su naturaleza, la mayoría de los suministros de energías renovables no pueden ajustarse a la demanda tan fácilmente como los combustibles fósiles. Las fuentes naturales de energía no pueden aparecer como por arte de magia cada vez que necesitamos energía: algunos días el viento no sopla y el sol no brilla. La energía hidráulica puede no estar disponible durante los períodos de sequía, y los cultivos de biomasa experimentan malas cosechas (al igual que los cultivos de alimentos). La mayoría de las fuentes de energías renovables tienen coeficientes de capacidad bajos y son menos consistentes que los combustibles fósiles, lo cual aumenta los costes.

El problema de ajustar oferta y demanda es más intenso en el mercado eléctrico, donde la oferta debe coincidir con la demanda en todo momento. Hasta cierto punto la demanda es predecible y las centrales de combustible fósil pueden ser programadas para ponerse en marcha y detenerse en momentos de cambios anticipados de

demanda. Las centrales adicionales que arrancan y se detienen rápidamente (por ejemplo, las turbinas de gas) pueden ser mantenidas en reserva para los cambios no anticipados de la demanda.

Del lado de las renovables, la energía solar y eólica no tienen esta característica en absoluto: la producción de energía simplemente no puede ser aumentada a demanda. La energía hidráulica puede ser regulada para ajustarse a la demanda si los pantanos son suficientes (y están adecuadamente recargados con lluvia). La biomasa es similar a los combustibles fósiles: disponible para ser quemada a demanda. La energía geotérmica es la más constante de las fuentes de energías renovables y puede ser puesta en marcha y detenida a demanda. La mayoría de los portfolios de energías renovables incluirán algunas fuentes que no están disponibles a demanda, y por lo tanto, la mayoría de las regiones deberán enfrentarse a la intermitencia de las fuentes de energía. Existen varias formas de abordar esta cuestión.

La diversidad energética es una de las formas de afrontar la intermitencia. Por ejemplo, la energía solar es más fuerte en el verano; mientras que, en la mayoría de los lugares, la energía eólica es más fuerte en el invierno. Una combinación de ambas puede proporcionar una generación anual de electricidad más consistente que cualquiera de ellas individualmente. Si esta diversidad de fuentes fuera elegida en una zona dada a pesar de todo, no habría un coste asociado al uso de la diversidad como método para corregir la intermitencia.

También es posible almacenar electricidad. Por ejemplo, las casas solares de áreas remotas pueden almacenar electricidad en baterías. El almacenamiento en baterías debe ser suficiente al menos para las noches y, a ser posible, con algo de energía adicional para los días nublados y/o períodos de mucho uso de electricidad. Esta misma tecnología podría ser desplegada a mayor escala, con edificaciones individuales que tengan instalaciones para almacenamiento de baterías. La energía renovable podría ser tomada de la red a medida que estuviera disponible y sería utilizada según fuera necesaria. El coste de la energía suministrada sería, entonces, el coste de producción más el coste de almacenamiento en baterías.

A escala de red eléctrica, el almacenamiento de electricidad se logra más frecuentemente con **almacenamiento de agua bombeada**. Cuando existe un exceso de electricidad en la red, el agua es bombeada de un depósito bajo a uno más alto. Cuando se necesita electricidad, el agua es enviada nuevamente hacia abajo y se genera electricidad. Esta es la misma tecnología que se usa en las centrales hidroeléctricas, pero con la posibilidad de "mover" el agua y la energía en ambas direcciones. Esta tecnología ya ha sido empleada para ser usada con fuentes de energía no-renovable, por ejemplo, en la estación hidráulica de almacenamiento por bombeo de Northfield Mountain, en Massachusetts (<http://www.firstlightpower.com/generation/north.asp>). Nuevamente, los costes del almacenamiento de la energía se suman a los costes de generación de la energía renovable.

**La redundancia de fuentes de energía** significa desarrollar una capacidad excesiva de generación. Los autores del estudio global de WWS (viento, agua y sol) mostrado en la Tabla 1 imaginaron generar un exceso significativo de capacidad eólica y solar, usando este exceso de energía para producir hidrógeno por medio de electrólisis. El hidrógeno podría, después, ser quemado para producir calor o para la generación de electricidad durante los períodos de baja disponibilidad de energías renovables. El coste de este tipo de sistemas reside en la infraestructura para producir, almacenar y quemar el hidrógeno.

En combinación con el exceso de capacidad, otra manera de abordar la intermitencia es una sólida red eléctrica nacional (y posiblemente internacional). Aunque puede que el viento no sople en un sitio concreto en un momento determinado, lo más probable es que haya viento soplando en algún lado en todo momento. Una red eléctrica puede usarse para trasladar la energía desde donde está siendo producida hasta donde es necesitada. Pero para trasladar grandes cantidades de electricidad a través de grandes distancias, hace falta una red de electricidad importante. Probablemente se necesiten políticas que apoyen el desarrollo de redes para respaldar el aumento de la utilización de energías renovables.

Finalmente, el coste marginal de la energía renovable sin duda variará sustancialmente dependiendo de las condiciones del ambiente. En momentos de poca disponibilidad de energía eólica, hidráulica y solar, el coste marginal de la energía renovable será muy alto. Podrían aplicarse **tarifas variables de electricidad**, calculadas con **medidores inteligentes de electricidad**, para cobrarles a los consumidores precios más altos por la electricidad durante los períodos en que el suministro de energía renovable fuera limitado. De esta manera, los consumidores podrían escoger limitar el uso de la electricidad o programar sus aparatos eléctricos para que sólo operen en momentos específicos de acuerdo a los precios. Por ejemplo, los calentadores de agua podrían ser programados para operar solamente en los períodos de bajo precio, ya que, dentro de un recipiente aislado, el agua se mantiene caliente durante varias horas.

También es probable que una transición completa hacia energías renovables lleve varios años (como se analiza a continuación). Mientras los recursos del combustible fósil se sigan utilizando, una de sus más valiosas funciones será la de equilibrar el suministro de la energía renovable con la demanda. La electricidad por gas natural es especialmente adecuada para este propósito, ya que las turbinas de gas natural pueden ser puestas en marcha y detenidas tan rápido como sea necesario.

### **Intensidad de Capital**

En comparación con los combustibles fósiles, la mayoría de las fuentes de energías renovables necesitan grandes inversiones de capital, como se muestra en la Tabla 4. Al quemar un combustible fósil como el gas natural para generar electricidad, una gran porción del coste total de la electricidad se deriva de la compra del gas, y estas compras de gas se extienden por un largo período de tiempo.

**Tabla 4. Coste de Capital de Fuentes de Electricidad Renovables y No-Renovables**

	<b>Capacidad Nominal (MW)</b>	<b>Coste de Capital (\$/kW)</b>	<b>Coefficiente de Capacidad Estimado</b>	<b>Capital \$/kW Esperado<sup>1</sup></b>
Gas natural: ciclo combinado	620	\$917	90%	\$1.019
Carbón: combustible pulverizado avanzado	650	\$3.246	90%	\$3.607
Hidroeléctrica: convencional	500	\$2.936	75%	\$3.915
Nuclear: unidad dual	2.234	\$5.530	90%	\$6.144
Eólica: en tierra	100	\$2.213	25%	\$8.852
Biomasa, ciclo combinado	20	\$8.180	90%	\$9.089
Eólica: marina	400	\$6,230	35%	\$17,800
Solar: fotovoltaica	150	\$3,873	20%	\$19,365
Solar: termoeléctrica	100	\$5,067	20%	\$25,335

Adaptado de la AIE (2013)

Para una central alimentada a gas con una vida útil de 50 años, 1\$ de gas comprado en el año 50, con una tasa de descuento del 5%, representaría apenas 0,09 \$ en valor actual al momento de la construcción de la central. Además, esto significaría que no haría falta pedir dinero prestado para financiar la compra de gas para los años futuros de producción de electricidad.

Las fuentes de energías renovables solar y eólica tienen bajos costes operativos; una vez que las instalaciones generadoras están construidas, la producción anual de energía implica un coste adicional bajo. Mientras esto representa una ventaja operativa sobre los combustibles fósiles, su contrapartida es un gasto inicial más alto. Construir una central de energía renovable es similar a construir una central de energía fósil, pero hay que sumar la compra de todo el combustible que la central de energía fósil usará durante toda su vida útil. Pocos propietarios de una vivienda comprarían una estufa a gas y, al mismo tiempo, todo el gas que la estufa usará durante toda su vida útil. Sin embargo, por su naturaleza, esto es lo que se espera de la mayoría de las fuentes de energías renovables.

El alto coste de capital de la mayoría de las energías renovables significa que el costo de la electricidad renovable es sensible a los tipos de interés. Los tipos de interés

<sup>1</sup> Para comparar fuentes con diferentes factores de capacidad, definimos \$/kW esperados como  $(\$/kW)/(\text{factor de capacidad})$ ; esto es, el coste de capital para producir la misma cantidad de electricidad que un kW de capacidad operando de forma continua.

<sup>2</sup> Además, existen subsidios implícitos a la industria nuclear involucrados en limitar la responsabilidad

elevados hacen que las fuentes de energías renovables sean significativamente menos atractivas en comparación con los combustibles fósiles; mientras que los tipos de interés reducidos hacen que las energías renovables sean más atractivas. Cambiar los tipos de interés cambia efectivamente el coste de la energía renovable, ya que los tipos de interés determinan el coste de financiación de la inversión inicial de capital.

## Mix de Energías Renovables y Conservación de la Energía

Si tiene conocimientos de microeconomía, usted sabrá que los valores marginales son una parte importante del asunto. Por ejemplo, es generalmente cierto que el beneficio se maximiza cuando el ingreso marginal (de cualquier cosa) es igual a su coste marginal. El **coste marginal** de algo es el coste de una unidad adicional, a partir de lo que ya tenemos (si yo tengo un panel de 5 kW de energía solar en mi patio, el coste marginal es el coste resultante de agregar un sexto kW. Este kW adicional puede ser más costoso que los primeros 5 kW, si tengo que usar una ubicación menos adecuada). Los costes marginales de la energía renovable son clave para comprender el mix óptimo de fuentes de energías renovables y el equilibrio entre producir y conservar energía.

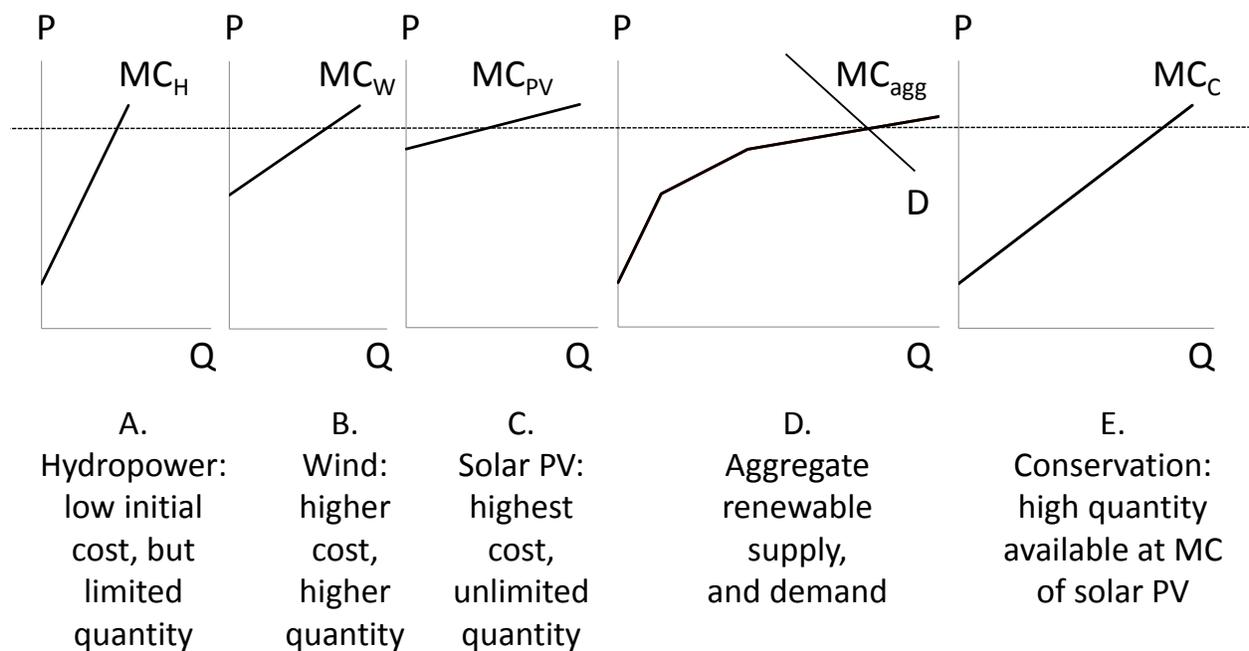
En general, los costes marginales para las fuentes de energías renovables en un lugar específico son crecientes. Construimos los primeros sitios de generación de energía hidráulica, eólica y solar en los lugares más accesibles, menos costosos y más productivos. Los incrementos adicionales de energía provienen de sitios que son más costosos para la implantación y/o producen menos energía.

Para lograr eficiencia económica, todas las fuentes de energía de un mercado específico deberían tener el mismo coste marginal. Por ejemplo, si yo pudiera obtener electricidad solar por 0,15 \$/kWh y electricidad eólica por 0,10 \$/kWh, evidentemente debería usar la energía eólica, que es más económica (suponiendo que no existieran externalidades ajenas al mercado). Al haber instalado más capacidad eólica, la siguiente unidad de energía eólica probablemente será más costosa (el costo marginal se eleva). Pero para minimizar mi costo de energía, debería seguir construyendo energía eólica mientras continúe siendo menos costosa que la electricidad solar. Si el coste marginal de una fuente de energía es más bajo que otro, esto significa que aún no he explotado la fuente de energía más barata y no he minimizado mis costes energéticos.

De este modo, el **principio de equimarginalidad** implica que se incurre en el coste total mínimo cuando todos los costes marginales son iguales. Un mix óptimo de fuentes de energías renovables tendría costes marginales iguales para todas las fuentes, lo cual significa que cada tipo de energía probablemente incluirá algunas fuentes de bajo costo y algunas de alto costo. Por ejemplo, un mix óptimo probablemente incluiría tanto energía hidráulica de bajo costo como energía hidráulica de alto costo, estando el coste marginal más alto cercano al coste de la electricidad solar.

La Figura 4 demuestra el principio de equimarginalidad de manera gráfica, con representaciones esquemáticas de curvas del costes marginales (CM) ilustrativas de un suministro de energías renovables en una región hipotética (un suministro real probablemente incluiría más fuentes). La energía hidráulica (panel A) es generalmente la fuente renovable menos costosa, al menos para cantidades iniciales, aunque los costes se elevan rápidamente, ya que se utilizan ubicaciones cada vez más difíciles. La energía eólica (panel B) es algo más costosa, pero a menudo disponible en mayores cantidades que la hidráulica, especialmente si se incluye el viento marino. La energía solar FV (panel C) es actualmente la fuente renovable más costosa, pero se encuentra disponible en cantidades casi ilimitadas. El panel D muestra una curva de coste marginal renovable agregado, una combinación de las curvas A, B y C.

**Figura 4. Igualdad en los costes marginales (CM) de las energías renovables y coste de conservación**



En la figura 4, panel D, la intersección entre la curva de oferta agregada creciente y la curva de demanda agregada decreciente (D) identifica la energía que nuestro mercado regional producirá. La línea punteada horizontal que atraviesan los paneles A-D de la Figura 4 muestra que, si aplicamos el principio de equimarginalidad, los costes marginales de todas las fuentes de energías renovables usadas son iguales. Aunque las cantidades iniciales de la energía hidráulica son mucho menos costosas que las de la energía solar FV, la oferta de energía menos costosa es suministrada por una combinación de energía hidráulica y eólica de alto precio, así como solar (dado que en este ejemplo necesitamos que las tres fuentes aporten la cantidad requerida de energía).

El coste marginal de la fuente de energía más costosa necesaria para satisfacer la demanda determina el coste marginal de todas las fuentes de energía que utilizamos (dado que los costes marginales deben ser iguales para minimizar el costo total). La energía solar FV es el recurso de energía renovable más costoso pero más abundante en este ejemplo, al igual que en muchas partes del mundo. El coste de la energía solar FV puede, por lo tanto, tener un gran efecto sobre la economía de las energías renovables en su totalidad. La investigación y el desarrollo llevados a cabo para reducir el coste marginal de la energía solar son críticos para extender el despliegue de la tecnología de las energías renovables.

## El Potencial de la Eficiencia Energética

Si la eficiencia económica exige la igualdad de los costes marginales para todas las fuentes de energía, entonces esto también es cierto para el ahorro energético, que facilita que haya más energía disponible por medio de la reducción de su uso. Si fuera menos costoso reducir el uso de energía a través del ahorro que incurrir en el coste de producir más energía, uno debería, obviamente, reducir el uso. El coste marginal del ahorro de energía debería igualar al coste marginal de la energía renovable. Esto se muestra en la Figura 4, panel E. El coste marginal del ahorro de energía es actualmente muy bajo comparado con el coste de las energías renovables, especialmente si lo comparamos con el coste de la energía solar FV, la energía renovable que probablemente determinará el coste marginal de todas las energías renovables. Por lo tanto, una cuestión importante a la hora de reemplazar los combustibles fósiles con las renovables es el desarrollo amplio de la eficiencia y el ahorro energético.

En el pasado, las construcciones residenciales en el norte de los Estados Unidos utilizaban aislante de pared de 4 pulgadas. Ahora es más común usar de 6 pulgadas, pero se puede lograr “súper-eficiencia” con aislantes aun más gruesos. Las ventanas también pueden ser súper-aislantes. En el pasado, los automóviles viajaban 15 millas (24 km) por cada galón de gasolina (MPG); ahora lo más común es 25 MPG (40km/G), pero con la tecnología existente, serían posibles 50 MPG (80 km/G) o más.

Teniendo en cuenta que las tecnologías para lograr mayor eficiencia ya existen, el problema es principalmente económico. Nuestra sociedad actual está diseñada alrededor de los precios de la energía en los niveles actuales. En el pasado, las paredes sólo tenían aislantes de 4” porque era más barato comprar energía que comprar más aislante (en valor actual, una vez descontados los gastos futuros de energía). Cuando cambia el precio de la energía cambia también el grosor óptimo de aislante de pared. Y esto ocurre con todos los usos de energía de la sociedad.

Si los costes de la energía aumentan con el agotamiento de los combustibles fósiles y el despliegue de las renovables de precios más altos, la eficiencia se convierte en una opción económicamente más atractiva. Esto ya puede verse en algunas zonas como Europa, donde históricamente los altos impuestos a la gasolina han creado

patrones de desarrollo y sistemas de transporte que son mucho menos intensos en energía que en los Estados Unidos. Si bien el precio no es el único factor determinante para el uso de energía, sí es un factor crítico.

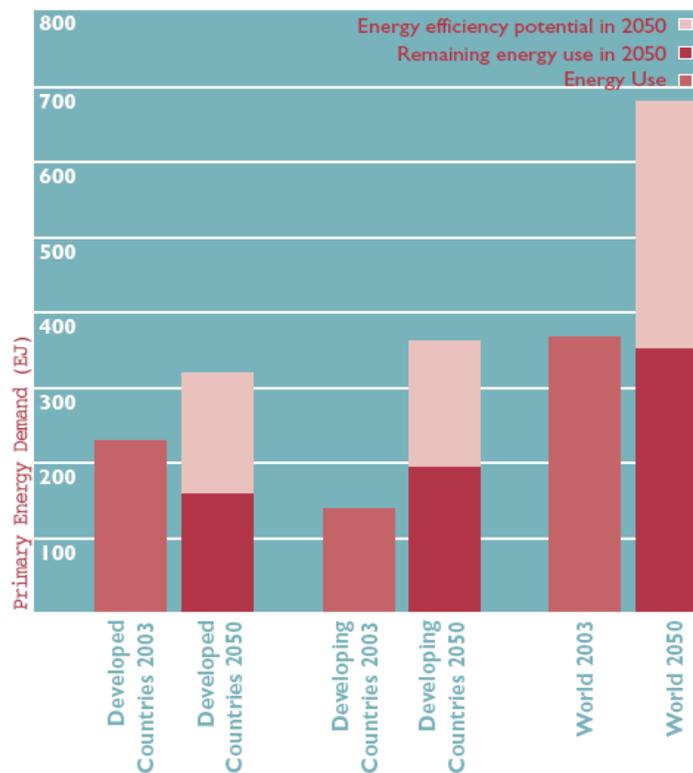
Puede lograrse un gran ahorro energético a un muy bajo costo. Tal como ha señalado la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos:

Mejorar la eficiencia energética en nuestros hogares, trabajos, escuelas, gobiernos e industrias (que consumen más del 70 por ciento del gas natural y la electricidad utilizadas en el país) es una de las maneras más constructivas y rentables de abordar el reto de los altos precios de la energía, la seguridad y la independencia energéticas, la contaminación del aire y el cambio climático global (National Action Plan for Energy Efficiency 2008).

En algunos casos, las mejoras en eficiencia energética pueden obtenerse por medio de cambios tecnológicos, como la reducción del uso de combustible por medio del uso de automóviles híbridos. En otros casos, la eficiencia energética significa cambiar conductas, como secar la ropa en un tendedero en vez de usar una secadora; o permitir que los platos se sequen con el aire dentro del lavavajillas, en vez de usar la función de "secado con calor". La posibilidad de gestionar el lado de la demanda para reducir el crecimiento previsto de consumo de energía es significativa.

En un escenario en el que *todo sigue igual (business as usual - BAU)*, se espera que la demanda global de energía prácticamente se duplique entre 2003 y 2050. Sin embargo, cálculos basados en el potencial sin explotar de la eficiencia energética, estiman que la demanda global podría mantenerse estable durante este período de tiempo, como se muestra en la Figura 5. En realidad, en los países desarrollados, la demanda de energía podría reducirse respecto a los niveles actuales. En las naciones en vías de desarrollo, el consumo de energía seguiría aumentando, pero sólo alrededor de un 40%, en lugar del 160% propio del escenario BAU (*business as usual*).

Figura 5. Potencial Global de la Eficiencia Energética



Fuente: Blok et al. (2008)

Lograr dichos resultados a partir de la eficiencia energética requerirá de una inversión sustancial, calculada en alrededor del 0,2% del PIB global (Blok et al. 2008). Sin embargo, las inversiones en eficiencia energética suelen ser mucho menos costosas que lo que implicaría satisfacer el crecimiento de la demanda a través del desarrollo de nuevas ofertas de energía. Actualmente, los programas de eficiencia energética bien diseñados cuestan en promedio alrededor de la mitad del coste de proporcionar nuevas reservas de energía (National Action Plan for Energy Efficiency 2006).

Otro estudio calcula el coste actual de la eficiencia energética entre cero y cinco centavos por kilovatio/hora (Lazard 2009). Al comparar este valor estimado con el coste actual de entre 0,20 \$ y 0,50 \$ de la electricidad FV (Figura 2), vemos las enormes posibilidades que hay de reducir el uso de energía a través del ahorro.

Estas cifras acerca del potencial de la eficiencia energética indican que ésta puede, de hecho, ser la “fuente alternativa de energía” con mayor potencial. La transición hacia una energía renovable puede lograrse tanto a través de la reducción de los requerimientos de energía de la vida diaria, como a través de la introducción de nuevas fuentes de energías renovables. La revolución de las energías renovables será, en gran medida, una revolución de la eficiencia y el ahorro energéticos.

Si los precios de la energía aumentaran como parte de la transición hacia las energías renovables, esto provocaría un incentivo para que el mercado saliera en búsqueda de una respuesta de mayor eficiencia. La sociedad respondería rediseñando todos los sistemas para utilizar menos energía. Pero incluso sin un aumento significativo del precio de la energía, es posible un importante avance en la eficiencia energética, y puede ser promovido a través del uso de normas, tales como los estándares sobre eficiencia energética de la administración Obama anunciados en 2011, que elevaría la eficiencia promedio de los combustibles de los nuevos vehículos a 54,5 mpg (millas por galón) para 2025. Otros estándares de eficiencia que pueden ser ajustados incluyen los de los edificios, los electrodomésticos, los equipos electrónicos y las bombillas.

Los economistas señalan que si se elevan los estándares de eficiencia sin que aumenten los precios de la energía, habrá un efecto **fuga** (como es más barato usar automóviles y electrodomésticos más eficientes, la gente podría responder utilizándolos más, contrarrestando, en parte, la reducción de uso de energía derivada de una mayor eficiencia). Existe también un interesante debate sobre si los precios deberían subir para reflejar las externalidades negativas del uso actual de los combustibles fósiles (analizado más adelante). Evidentemente, el aumento de los precios de la energía no es una medida popular, pero desde una visión económica, es la mejor manera de promover el aumento de la eficiencia.

### **Subsidios a la Energía**

En el análisis anterior se supone un mercado libre y no regulado para la energía, lo cual no es el caso en la mayor parte del mundo actual. En particular, muchas formas de

utilización de energía son respaldadas financieramente o subsidiadas por los gobiernos. Los subsidios a la energía pueden adoptar varias formas, entre ellas:

- Pagos directos o préstamos ventajosos: un gobierno le puede pagar a una empresa un subsidio por unidad por producir productos específicos o concederle un préstamo con tipos de interés por debajo de los del mercado.
- Créditos fiscales y deducciones: un gobierno puede permitir que individuos y empresas reclamen créditos fiscales por acciones como la instalación de aislantes o la compra de un vehículo eficiente en el consumo de combustible. **Las desgravaciones por agotamiento de recursos (depletion allowances)** son una forma de crédito fiscal extensamente usada en la producción de petróleo.
- Apoyo a los precios: por ejemplo, el precio que reciben los productores de energías renovables puede estar garantizado o tener un valor mínimo comprometido. **Tarifas subvencionadas de introducción de energía en la red**, comúnmente usadas en Europa, garantizan a los productores de energía solar y eólica un cierto índice de ventas de su energía a la red nacional.
- Cupos de compra obligatoria: éstas incluyen leyes que exigen que la gasolina contenga un porcentaje específico de etanol o que los gobiernos compren un porcentaje específico de su energía a fuentes de energías renovables.

Los subsidios pueden estar justificados siempre y cuando respalden bienes y servicios que generen **externalidades positivas**. Actualmente, todas las fuentes de energía reciben algún grado de respaldo con subsidios, pero, como se analiza en el Cuadro 5, los subsidios favorecen fuertemente a los combustibles fósiles. Dado que el combustible fósil tiende a generar externalidades negativas más que positivas, es difícil justificar dichos subsidios desde el punto de vista de la teoría económica. Dirigir la mayor parte de los subsidios a la energía hacia los combustibles fósiles inclina la balanza a su favor con respecto a las renovables.

En 2009 las naciones del G20, un grupo de las principales economías que incluye tanto a países desarrollados como a países en vías de desarrollo, acordaron “racionalizar y eliminar gradualmente los subsidios a combustibles fósiles ineficientes que fomentan el consumo excesivo” y “adoptar políticas que irán suprimiendo gradualmente dichos subsidios en todo el mundo” (IEA 2011d). La Agencia Internacional de Energía señala:

“Los subsidios a la energía (medidas gubernamentales que bajan artificialmente el precio de la energía pagado por los consumidores, aumentan el precio recibido por los productores o reducen el coste de la producción) son elevados y generalizados. Cuando están bien diseñados, los subsidios a las energías renovables y a las tecnologías energéticas con bajo contenido de carbono pueden traer beneficios económicos y ambientales a largo plazo. Sin embargo, cuando están dirigidos a los combustibles fósiles, los costes generalmente pesan más que los beneficios. Los subsidios a los combustibles fósiles fomentan el consumo derrochador, exacerbando la volatilidad del precio de la energía desdibujando las señales del mercado, incentivan la adulteración y el

contrabando de combustible y socavan la competitividad de las energías renovables y de otras tecnologías energéticas de baja emisión” (IEA 2011c).

Los subsidios a los combustibles fósiles del sector eléctrico a nivel global suman alrededor de 100.000 millones de \$ al año (Kitson, Wooders and Moerenhout 2011). Los datos sobre los subsidios a la energía nuclear son difíciles de conseguir, pero la limitada información disponible sugiere que los subsidios nucleares globales suman al menos 10.000 millones de \$.<sup>2</sup> Los subsidios mundiales a las formas renovables de energía suman alrededor de 30.000 millones de \$ al año, pero están creciendo con más rapidez que otros subsidios.

Mientras que la mayor parte de los subsidios al sector eléctrico va dirigida a los combustibles fósiles, si pensamos en términos de kilovatio por hora, en realidad los subsidios les dan una ventaja de precio a las energías renovables. Efectivamente, los subsidios reducen el precio de la electricidad originada en combustibles fósiles alrededor de un centavo por kilovatio-hora. Pero, según algunas estimaciones, en 2007 los subsidios redujeron el precio por kilovatio-hora de la energía eólica en 7 centavos, el de la energía solar concentrada en 29 centavos, y el de la energía solar fotovoltaica en 64 centavos (Badcock and Lenzen 2010). Por lo tanto, los subsidios al sector eléctrico están, en general, fomentando una transición hacia las energías renovables.

En el sector del transporte, los subsidios globales al petróleo promediaron unos 200.000 millones de \$ por año en el período 2007-2009 (Charles and Wooders 2011). Con un consumo anual a nivel global de alrededor de 1,3 billones de galones, esto significa un subsidio de unos 0,15 \$ por galón. Si asumimos que este valor es aplicable para los Estados Unidos, los subsidios al petróleo prácticamente anulan el impuesto federal a la gasolina de 18 centavos por galón. El otro destinatario importante de subsidios del sector del transporte es el biocombustible. Se estima que los subsidios globales a los biocombustibles son de aproximadamente 20.000 millones de \$, y crecen rápidamente.

---

<sup>2</sup> Además, existen subsidios implícitos a la industria nuclear involucrados en limitar la responsabilidad frente a accidentes. La Ley Price-Anderson de los Estados Unidos limita la responsabilidad del operador nuclear a menos de medio millón de dólares, aunque los costes potenciales de un accidente importante podrían ser mucho mayores.

### **Cuadro 5. Subsidios al Combustible Fósil**

Según el análisis de Bloomberg New Energy Finance, los subsidios globales a los combustibles fósiles son aproximadamente doce veces mayores que los subsidios asignados a las energías renovables. En 2009, los subsidios globales para las energías renovables eran entre 43.000 y 46.000 millones de \$, principalmente en formas de créditos fiscales y tarifas subvencionadas. Mientras tanto, la Agencia Internacional de Energía estimó que los gobiernos gastaron alrededor de 550.000 millones de \$ en subsidiar a los combustibles fósiles.

Los países del G20 han acordado eliminar gradualmente los subsidios a los combustibles fósiles “a medio plazo”, pero el progreso ha sido lento y no se ha establecido ninguna fecha límite específica. Mientras tanto, muchos países están redoblando su compromiso hacia las energías renovables. El subsidio a una energía renovable más costoso de 2009 fue la tarifa subvencionada de Alemania, que costó casi 10.000 millones de \$. Otras tarifas subvencionadas en Europa sumaron otros 10.000 millones de \$.

Los Estados Unidos gastaron más que cualquier otro país en subsidios a las energías renovables: alrededor de 18.000 millones de \$. China gastó unos 2.000 millones de \$, aunque esta cifra es probablemente más baja que la real, ya que no incluye los préstamos a bajo interés ofrecidos por bancos estatales a proyectos de energías renovables.

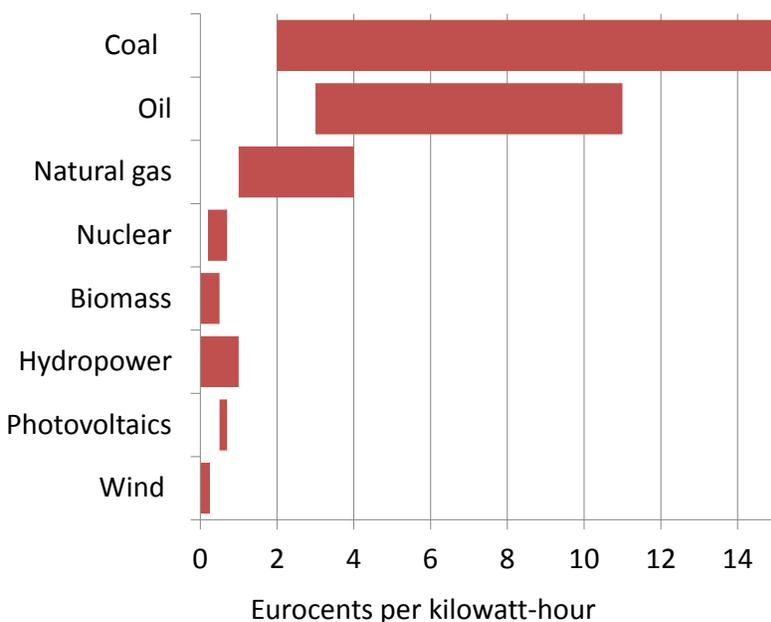
Fuente: Morales (2010)

### **Externalidades Ambientales**

Además de la reforma de los subsidios, la teoría económica también apoya **la internalización de externalidades**. El precio de cada fuente de energía debería reflejar sus costos sociales totales. Varios estudios sobre las externalidades de la energía sugieren que si el precio de todas las fuentes de energía incluyera los costes de las externalidades, ya estaría mucho más avanzada una posible transición hacia las energías renovables.

La Figura 6 ofrece un resumen del rango de costes externos asociados con diferentes fuentes de energía, basado en análisis europeos. El coste por externalidades del carbón es particularmente alto, oscilando entre 2 y 15 centavos de euro por kilovatio-hora. Este dato es consistente con los resultados de otra investigación que estima que el coste externo de la electricidad por carbón en los Estados Unidos está alrededor de los 6 centavos por kilovatio-hora (Jacobson and Delucchi 2011b). Las externalidades asociadas con el gas natural son más bajas, pero aun así, oscilan entre 1 y 4 centavos de euro por kilovatio-hora, también un resultado consistente con las estimaciones de los Estados Unidos.

**Figura 6. Coste de las Externalidades de Varios Métodos de Generación de Electricidad, Unión Europea**



Fuente: Owen (2006)

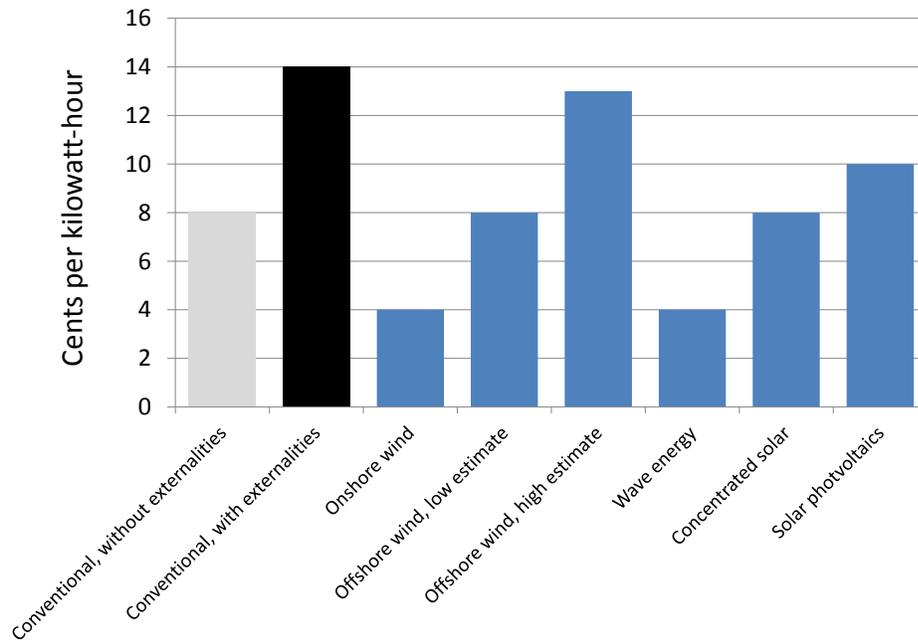
Los costes de las externalidades asociadas con las energías renovables son mucho más bajos, menos de un centavo de euro por kilovatio-hora. Por lo tanto, si bien es posible que los combustibles fósiles tengan actualmente una ventaja de coste sobre las renovables basándose sólo en los precios del mercado, si las externalidades fueran incluidas, varias renovables probablemente se convertirían en las fuentes de energía más económicas. En particular las energías eólica terrestre, geotérmica y de biomasa. De manera similar, la ventaja de coste del petróleo en el transporte probablemente desaparecería si en el precio se tuvieran en cuenta las externalidades en su totalidad (Ver, por ejemplo, Odgen, Williams and Larson 2004).

Las externalidades de funcionamiento de la energía nuclear son relativamente bajas, ya que el ciclo de vida de la energía nuclear genera bajos niveles de contaminación del aire y de emisiones de gas de efecto invernadero. Pero los factores externos potencialmente más significativos de la energía nuclear son los riesgos de un accidente grave y el almacenamiento a largo plazo de los desechos nucleares. Estos impactos son difíciles de estimar en términos monetarios y, como resultado, es posible que las estimaciones mostradas en la Figura 6 infraestimen las verdaderas externalidades negativas asociadas con la energía nuclear (ver también el Cuadro 1 anterior).

Nuestro análisis sugiere que actualmente el factor que en mayor medida imposibilita una transición hacia una energía renovable es el hecho de que no se tomen en cuenta las externalidades. Contar con los precios “correctos” les enviaría a las compañías y a los consumidores la señal de que continuar dependiendo de los combustibles fósiles es una mala idea económica.

La Figura 7 muestra una comparación de las previsiones de costes en la generación de electricidad en 2020, utilizando métodos tradicionales de combustibles fósiles y varias alternativas renovables. Basándose sólo en los costes de producción, se espera que todas las fuentes renovables, de energía eólica en tierra, energía de las olas, energía solar concentrada y, potencialmente, energía eólica marina, tengan costes competitivos con los de los combustibles fósiles. Cuando se incorporan los impactos de las externalidades, todas las fuentes de energías renovables se vuelven menos costosas que los combustibles fósiles. Estos resultados implican que existen buenas razones económicas para promocionar una transición hacia las energías renovables. En la sección final de este módulo analizaremos en mayor profundidad la transición hacia las energías renovables.

**Figura 7. Costes de los diferentes métodos de Generación de Electricidad, 2020**



Fuente: Jacobson y Delucchi (2011b)

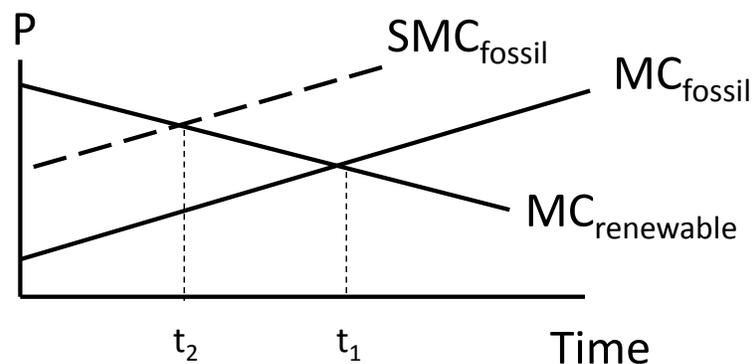
## 4. LA TRANSICIÓN HACIA LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Al principio de este módulo afirmamos que finalmente toda la energía será renovable. Esto tiene que ser cierto, ya que los combustibles fósiles son finitos y las cantidades disponibles sólo pueden ir disminuyendo con el tiempo. Sin embargo, no hay certeza aún de cuándo será ese "finalmente", ni de cuánto daño puede generar el cambio climático antes de una transición hacia las energías renovables. Hay tres dinámicas que afectan a la velocidad de la transición: el aumento en los costes de los combustibles fósiles, la disminución en los costes de las energías renovables y la implementación de políticas que aceleren la transición, que incluye políticas que internalicen las externalidades para reflejar los verdaderos costes de los combustibles fósiles.

### Aumento de los Costes de los Combustibles Fósiles

Las energías renovables serán adoptadas cuando los combustibles fósiles escaseen lo suficiente como para que se vuelvan más caros que las renovables; es decir, cuando los combustibles fósiles estén económicamente agotados. En la Figura 8, la curva de precio ascendente del combustible fósil ( $MC_{fossil}$ ) refleja el coste en aumento de la extracción del combustible fósil. El agotamiento económico de los combustibles fósiles podría llevar mucho tiempo. Aún hay una gran cantidad de petróleo líquido en el suelo y las nuevas tecnologías hacen que extraer el petróleo de las formaciones de pizarra bituminosa (oil shale) sea más barato. También tenemos sustitutos cercanos para el petróleo de los pozos tradicionales, como el petróleo de las arenas bituminosas y el petróleo sintético hecho a partir de carbón. También se consiguen mayores reservas de gas natural con el uso de las tecnologías de fracturación hidráulica ("fracking") y hay grandes reservas de carbón que continúan sin ser explotadas. Pero muchas de estas nuevas tecnologías implican costes más altos, por lo que es de esperar que, con el tiempo, haya una tendencia ascendente en los precios del combustible fósil.

**Figura 8. Dinámica de la transición hacia las energías renovables**



## Disminución de los Costes de las Energías Renovables

Al mismo tiempo que los precios del combustible fósil aumentan, las nuevas tecnologías probablemente reducirán los costes de las energías renovables, tal como indica la curva descendente de los precios de las energías renovables ( $MC_{\text{renovable}}$ ) en la Figura 8. En el momento  $t_1$ , las curvas de suministro de los combustibles fósiles y la energía renovable se cruzan y los costes son iguales. Después de  $t_1$  la energía renovable será menos costosa que los combustibles fósiles y las fuerzas del mercado lograrán entonces la transición hacia las energías renovables con poca ayuda, o incluso sin ella.

Donde esto ya ha pasado, las energías renovables prevalecen. Por ejemplo, en Islandia el agua caliente geotérmica es más barata que el carbón o la gasolina para la calefacción de edificios y la mayoría de los edificios son hoy en día calentados con agua geotérmica (aunque hizo falta ayuda del gobierno para desarrollar los sistemas necesarios por zonas). De manera similar, la energía hidráulica ya es extensamente utilizada en los lugares en los que es más barato que sus alternativas, por ejemplo en el noroeste del Pacífico de los Estados Unidos.

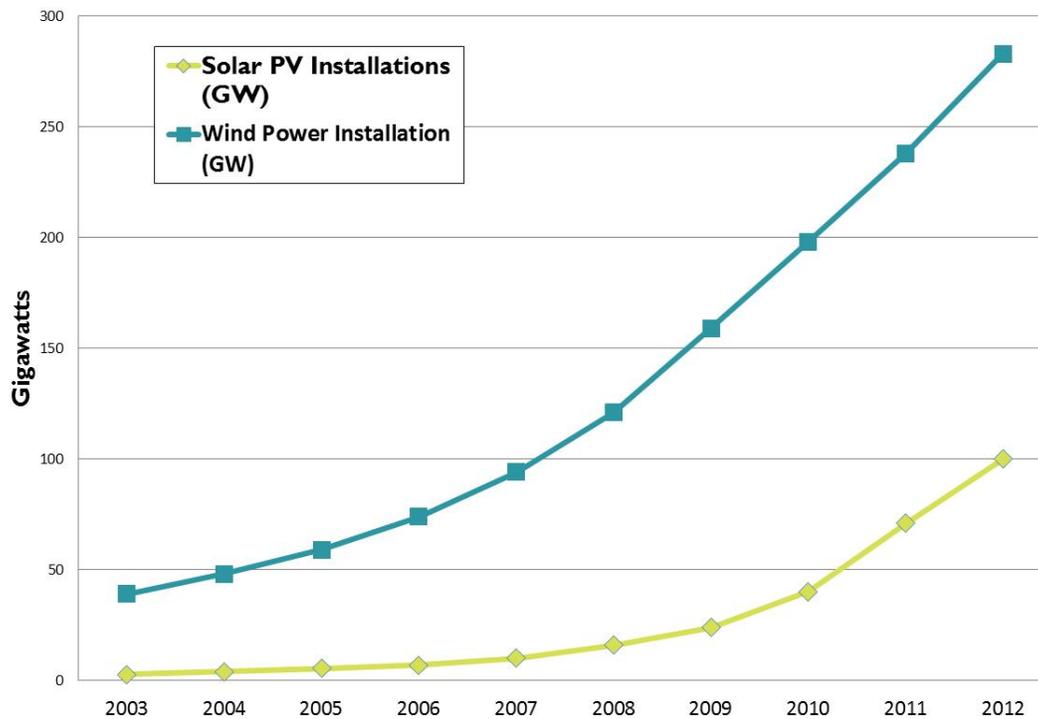
Si bien existen historias de éxito para tecnologías de energías renovables, es incierto el ritmo que puedan llevar las mejoras necesarias para que las energías renovables desplacen a los combustibles fósiles. Por ejemplo, las mejoras en los procesos para fabricar paneles solares fotovoltaicos están bajando el coste de producción de los paneles, pero aún tenemos costes de intermitencia diaria y estacional. La tecnología del etanol celulósico permite la producción de etanol a partir de un tipo de pasto (pasto varilla o *panicum virgatum*) en vez de maíz, aunque la disponibilidad de tierras aún es una limitación para la producción de ese pasto. Los avances tecnológicos pueden reducir los costes de las energías renovables hasta cierto punto, pero no pueden cambiar las características fundamentales de las fuentes de energía.

Esto es particularmente obvio en el margen: a pesar de que a gran escala las energías hidráulica y de biomasa tienen el potencial de producir energía con precios cercanos a los de los combustibles fósiles, las cantidades de estas fuentes de energía son muy limitadas en comparación con el uso actual y, en muchos sitios, no pueden ser ampliadas. La energía solar FV y la eólica marina podrían ser las únicas fuentes renovables con la abundancia suficiente para desplazar a los combustibles fósiles. Si bien los costes de estas tecnologías están bajando, lo están haciendo a una tasa decreciente, como se muestra en la Figura 3. No está claro en qué momento los precios de las energías solar FV y eólica marina se emparejarán con los combustibles fósiles.

Como se muestra en la Figura 9, el uso mundial de las energías solar y eólica han crecido rápidamente, con un crecimiento acelerado en los últimos años. Según un informe reciente del Departamento de Energía de los Estados Unidos “la capacidad instalada de los sistemas fotovoltaicos (FV) mundiales y de los Estados Unidos ha

aumentado enormemente en los últimos años, impulsada por los precios a la baja de la tecnología FV y los incentivos gubernamentales. La iniciativa SunShot del Departamento de Energía de los Estados Unidos apunta a hacer que el coste de la tecnología FV sea competitivo sin incentivos, reduciendo un 75% entre 2010 y 2020 el coste de la electricidad generada por paneles FV". (DOE 2012)

**Figura 9: Crecimiento de la Energía Solar FV e Instalaciones Eólicas (2003-2012)**



Fuente: Worldwatch Institute (2014).

Según el informe de 2014 del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, desde 2007 “Muchas tecnologías de energías renovables (ER) han demostrado sustanciales mejoras en el rendimiento y reducciones de costes, y un creciente número de tecnologías de ER ha alcanzado un nivel de madurez que permitió su despliegue a una escala significativa” (IPCC 2014). También están siendo muy promocionados los innovadores métodos de financiación de instalaciones solares para consumidores (ver Cuadro 6).

## Cuadro 6: Financiación de Instalaciones Solares

Los costes a la baja de los sistemas de energía solar, combinados con los incentivos fiscales federales, los han puesto al alcance de muchos consumidores. Pero aún quedan algunas barreras. La energía solar fotovoltaica aún no es competitiva a nivel mayorista (ver Figura 2). En 2014 abrió una enorme central de concentración de energía solar en el Desierto de Mojave, en California Sur; pero a pesar de su óptima ubicación, las perspectivas para el desarrollo futuro de dichas centrales son limitadas:

“La central de energía de Ivanpah ocupa más de cinco millas cuadradas del Desierto de Mojave. Casi 350.000 espejos del tamaño de una puerta de garaje se inclinan hacia el sol con la capacidad de proveer de energía a 140.000 hogares. La central es el primer generador de electricidad de su tipo y también podría ser el último. Desde que comenzó el proyecto, el precio de las tecnologías competidoras se ha desplomado, los incentivos han comenzado a desaparecer y el apetito de los inversores por las gigantescas granjas solares ha menguado. Aunque hay varios proyectos nuevos y grandes que han aparecido en internet en los últimos meses, los expertos dicen que pocos están comenzando a construirse y que no todos aquellos en desarrollo serán completados” (Cardwell and Wald 2014).

Al mismo tiempo, la energía solar ha estado haciendo grandes avances a nivel minorista. La ventaja económica de instalar un sistema solar en un hogar o un negocio particular es que los costes de distribución, que pueden representar alrededor de la mitad de los costes finales de la electricidad, son evitados.<sup>1</sup> Esto significa que, como se muestra en la Figura 2, la energía solar FV está entrando a un nivel competitivo a nivel minorista. Y los sistemas solares comunitarios están brindando un medio a aquellos clientes residenciales cuyas propiedades no son adecuadas para una instalación solar:

“Como muchos consumidores, David Polstein ya había hecho mucho para reducir el uso de energía en su gran casa Victoriana de Newton, Massachusetts. Reemplazó sus electrodomésticos con modelos eficientes en el consumo de la energía, instaló una mejor calefacción y colocó un nuevo aislante. Pero no pudo colocar un sistema solar para reducir su factura de electricidad porque su techo es demasiado pequeño y sombrío. . . Ahora, eso podría estar cambiando. El Sr. Polstein está considerando unirse a un jardín solar comunitario que es uno de los muchos sistemas similares disponibles actualmente en Massachusetts. Por medio de este método (introducido por primera vez en Colorado y extendiéndose por el país) los clientes invierten en un sistema solar construido en otro lado y reciben crédito en sus cuentas de electricidad por la energía que sus paneles producen. . . éste es uno de los muchos mecanismos de financiación pensados para alentar el desarrollo de la energía solar, que incluye desde programas de leasing residencial hasta financiación colectiva. La combinación entre el desplome de los precios de los equipos solares y de su instalación, y los generosos incentivos federales y estatales, ha ampliado su aceptación” (Cardwell 2014).

Las instalaciones solares implican altos costes anticipados, pero los consumidores son recompensados con facturas de electricidad más bajas (a menudo sin tarifa alguna). Si los costes eléctricos aumentan en el futuro, ya sea debido a los límites de otras fuentes de suministro o a políticas tales como los impuestos sobre el carbono, los sistemas instalados se volverían aun más beneficiosos en términos de costes eléctricos evitados.

## Consideración de las Externalidades de los Combustibles Fósiles

Si el único problema fuera la disponibilidad de combustible, tomarse mucho tiempo para hacer la transición hacia una energía renovable no sería necesariamente un problema para la sociedad. Pero, por supuesto, hay otro problema: la combustión del carbono de origen fósil genera dióxido de carbono, el cual afecta al cambio climático. La mayoría de los científicos creen que ya es demasiado tarde para evitar un daño significativo por el cambio climático y que esperar a que los combustibles fósiles se agoten para implementar las fuentes de energías renovables podría ser catastrófico para la civilización. Esto representa un fuerte argumento favorable a internalizar los costes esperados del cambio climático en el precio de los combustibles fósiles.

Las políticas para internalizar los costes externos de los combustibles fósiles se muestran en la curva del costo marginal social del combustible fósil de la Figura 8 ( $SMC_{fósil}$ ). Los costes del cambio climático y de otra contaminación originada en los combustibles fósiles, aconsejan establecer impuestos sobre los combustibles fósiles que reflejen los costes de esta contaminación para la sociedad. Un impuesto sobre los combustibles fósiles aumentaría sus precios, colocándolos más cerca del verdadero coste marginal de utilizar combustibles fósiles. En la Figura 8, el  $SMC_{fósil}$  está por encima de la curva del  $MC_{fósil}$ , representando los costes sociales de quemar combustibles fósiles, así como los impuestos que podrían ser instaurados para reflejar este coste.

Tal como se muestra en la Figura 8, aumentar los precios de los combustibles fósiles con impuestos correctivos reduce el momento de la transición hacia las energías renovables de  $t_1$  a  $t_2$ . Aumentar los precios de los combustibles fósiles también implica un mayor incentivo para el ahorro de energía, reduciendo la cantidad total de energía necesaria para la sociedad y logrando una gran parte de la transición hacia las energías renovables.

Hacer que los precios de los combustibles fósiles reflejen los costes de sus externalidades es, probablemente, la única manera de lograr una rápida transición hacia las energías renovables en un futuro cercano (aunque es posible que sea difícil desarrollar la voluntad política necesaria), y posiblemente sea también la única opción con el potencial necesario para evitar los efectos más desastrosos del cambio climático. Al aumentar los precios de los combustibles fósiles, los precios de la energía fósil continuarían subiendo debido al agotamiento, y los precios más altos acelerarían las mejoras tecnológicas, reduciendo los costes de las energías renovables. Las tres dinámicas mostradas en la Figura 8 podrían funcionar simultáneamente.

## **Cuadro 7. Portugal intenta una reforma hacia una Energía Limpia**

“Cinco años atrás, los líderes de esta nación abrasada por el sol y barrida por el viento hicieron una apuesta: Para reducir la dependencia de Portugal de los combustibles fósiles importados, se embarcaron en una serie de ambiciosos proyectos de energías renovables; aprovechando principalmente el viento y la energía hidráulica del país, pero también su luz solar y las olas del océano.

Hoy, los bares de moda de Lisboa, las fábricas de Oporto y los elegantes resort del Algarve funcionan básicamente con energía limpia. Este año, cerca del 45 por ciento de la electricidad de la red de Portugal vendrá de fuentes renovables, cuando hace apenas cinco años la cifra era del 17 por ciento.

La energía eólica terrestre (considerada este año como "potencialmente competitiva" frente a los combustibles fósiles por la Agencia Internacional de Energía de París) se ha expandido siete veces su tamaño en ese período de tiempo. Y Portugal espera convertirse en 2011 en el primer país en inaugurar una red nacional de estaciones de carga para automóviles eléctricos.

"He visto muchas sonrisas, ustedes saben que es un sueño; que es imposible competir; que es muy caro", dijo el primer ministro José Sócrates, recordando la manera en que Silvio Berlusconi, el primer ministro italiano, burlescamente, le ofreció construirle un ferrari eléctrico. Sócrates agregó: "La experiencia de Portugal muestra que es posible hacer estos cambios en un tiempo muy corto".

Portugal estaba bien preparado para ser conejillo de indias, porque cuenta con muchos recursos aún no explotados de energía eólica y fluvial, las dos fuentes renovables más rentables. Los funcionarios del gobierno dicen que la transformación energética no requirió aumentos en los impuestos ni contraer deuda pública, precisamente porque las nuevas fuentes de electricidad, que no necesitan combustible ni producen emisiones, reemplazaron a la electricidad, que en el pasado era producida comprando y quemando gas natural, carbón y petróleo importados. Para 2014, el programa de energía renovable le permitirá a Portugal cerrar al menos dos centrales de energía convencionales y reducir el funcionamiento de otras".

Fuente: Rosenthal (2010)

## Políticas para la Transición hacia las Energías Renovables

Las políticas gubernamentales pueden claramente afectar a la velocidad de la transición hacia una economía de energías renovables, como se muestra en el ejemplo de Portugal del Cuadro 7. ¿Qué tipos de políticas públicas son las más importantes para promover una transición oportuna y eficiente hacia las fuentes de energías renovables? Como se analizó previamente, un objetivo acordado por muchas de las más grandes naciones del mundo es la eliminación gradual de los ineficientes subsidios a los combustibles fósiles. Hay que tener en cuenta que, en el corto plazo, esto podría llevar a un aumento en los precios de la energía y a una disminución del crecimiento económico. Por otro lado, el dinero que los gobiernos ahorrasen podría ser invertido de manera que se redujera el costo de las alternativas renovables, fomentando así una transición más rápida hacia las energías renovables.

En el largo plazo, la reforma de los subsidios sería económicamente beneficiosa:

“...una reforma de los subsidios de los combustibles fósiles daría como resultado aumentos adicionales en el producto interior bruto (PIB), tanto en países de la OCDE como en países que no pertenecen a la OCDE. El aumento esperado es del 0,7 por ciento anual hasta 2050.... Los resultados de una gran variedad de estudios en modelos económicos globales y nacionales sobre reforma de subsidios sugieren que, a nivel agregado, es probable que los cambios sean positivos para el PIB, debido a los incentivos resultantes de los cambios de precios que llevan a una asignación más eficiente de recursos”. (Ellis 2010, p. 7, 26).

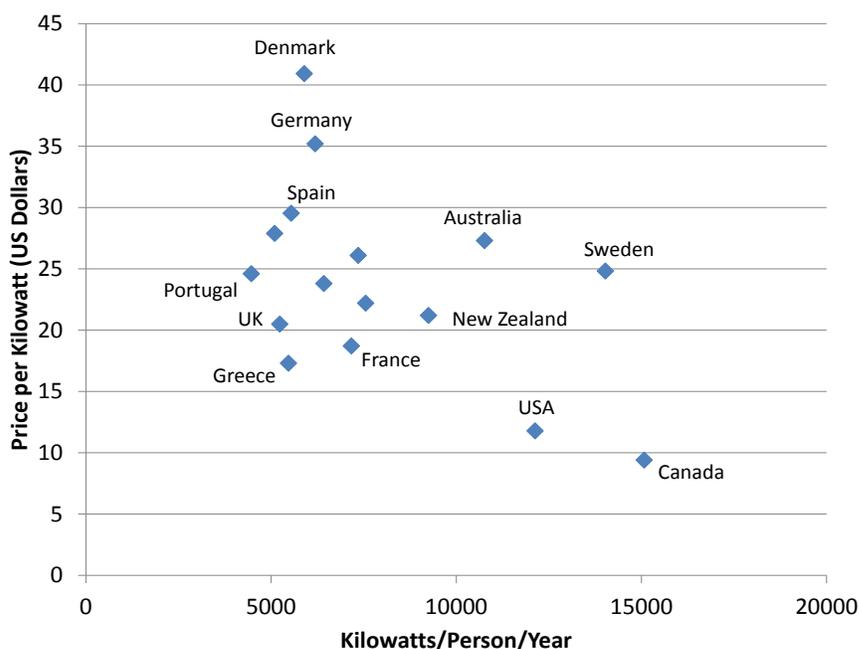
Como se analizó previamente, un asunto de gran importancia es la necesidad de que los precios de la energía reflejen los verdaderos costes que su uso tiene para la sociedad. Los llamados **impuestos pigouvianos** (por el economista Arthur Pigou) pueden ser usados para lograr esto. Una figura habitual consiste en un impuesto pigouviano sobre la gasolina. Aunque los gobiernos pueden utilizar este impuesto básicamente para aumentar los ingresos, también sirve para reflejar los costes del uso de gasolina para la sociedad. A pesar de que el precio del crudo está determinado por un mercado global, el precio minorista de la gasolina varía enormemente entre los países debido a diferencias en los impuestos sobre los carburantes. A finales de 2010, el precio de la gasolina osciló entre menos de 1\$ por galón en países como Venezuela, Arabia Saudita y Kuwait, donde la gasolina, más que sujeta a impuestos, está subsidiada, y 8 \$ por galón en países como Francia, Noruega y el Reino Unido, donde la gasolina está sujeta a altos impuestos.

La teoría económica sugiere que el impuesto “correcto” sobre la gasolina debería representar sus externalidades negativas. En los Estados Unidos, el impuesto federal actual sobre la gasolina es de 18 centavos por galón (una cantidad que no ha cambiado desde 1993), además de los impuestos estatales, que varían entre 8 y 50 centavos por galón. Prácticamente todos los economistas coinciden en que estos impuestos son muy bajos, aunque hay desacuerdo respecto a cuánto deberían subir.

Mientras algunos economistas sugieren que debería ser 60 centavos más alto, otros sugieren que los impuestos a la gasolina deberían estar por encima de los 10 \$ por galón (International Center for Technology Assessment 1998; Parry and Small 2005)

Los impuestos pigouvianos también pueden ser aplicados al sector de la electricidad. Como vemos en la Figura 10, los precios de la electricidad varían entre países, principalmente debido a variaciones en los tipos impositivos. En general, los altos precios de la electricidad están asociados con bajos índices de consumo per capita.

**Figura 10. Precios de la Electricidad e Índices de Consumo**



Fuentes: Energy Prices and Statistics database, International Energy Agency; International Energy Statistics database, U.S. Energy Information Administration.

Por ejemplo, Estados Unidos tiene precios de electricidad relativamente bajos e índices de consumo relativamente altos. Los precios de la electricidad en Alemania, España y Dinamarca son mucho más altos y los índices de consumo per capita son aproximadamente la mitad que en los Estados Unidos. Si bien existen otras diferencias entre estos países, los impuestos pigouvianos son casi siempre efectivos porque aprovechan uno de los resultados más fiables de la economía, la **ley de la demanda**: cuando los precios aumentan, las cantidades demandadas bajan.

Además de reducir los subsidios a los combustibles fósiles y de aplicar impuestos pigouvianos, otras opciones de políticas para fomentar una transición hacia energías renovables son:

1. Investigación y desarrollo en energía
2. Tarifas subvencionadas de introducción de energía en la red

3. Subsidios, incluyendo créditos fiscales y plazos de crédito favorables
4. Establecimiento de objetivos acerca de las energías renovables
5. Mejoras y estándares relativas a la eficiencia

*Los gastos en investigación y desarrollo (I+D) acelerarán la maduración de las tecnologías de energías renovables. Los gastos en I+D en energía han ido aumentando en los últimos años, desde 18.000 millones de \$ a nivel global en 2004 hasta 122.000 millones de \$ en 2009. Los países que están invirtiendo fuertemente en I+D en energía probablemente obtengan una ventaja competitiva en este área en el futuro.*

Aquellas naciones (como China, Brasil, el Reino Unido, Alemania y España) con fuertes políticas nacionales dirigidas a reducir la contaminación del calentamiento global e incentivar el uso de energías renovables están estableciendo posiciones competitivas más fuertes en la economía de la energía limpia. Las naciones que buscan competir de manera efectiva por puestos de trabajo y manufactura de energía limpia deberían evaluar la variedad de mecanismos políticos que pueden ser utilizados para estimular la inversión en energía limpia. China, por ejemplo, ha establecido ambiciosos objetivos para la energía eólica, de biomasa y solar, y en 2009, por primera vez, ocupó el primer lugar dentro del G-20 y en todo el mundo en cuanto a financiación e inversión de energía limpia. Los Estados Unidos cayeron al segundo lugar. Considerando el tamaño de su economía, los niveles de financiación e inversión de los Estados Unidos en energía limpia quedaron rezagados con respecto a muchos de sus socios del G-20. Por ejemplo, en términos relativos, España invirtió cinco veces más que los Estados Unidos, y China, Brasil y el Reino Unido invirtieron tres veces más (Pew Charitable Trusts 2010).

*Las tarifas subvencionadas garantizan que los productores de energías renovables accedan a las redes de electricidad y a contratos de precios de largo plazo. Los que se benefician de las tarifas subvencionadas pueden no ser empresas. Por ejemplo, los propietarios de viviendas que instalan paneles solares FV podrían vender cualquier exceso de energía a su compañía de electricidad a un precio preestablecido. Las políticas de tarifas subvencionadas han sido instituidas por docenas de países y por varios estados de los Estados Unidos. Las más ambiciosas son las de Alemania, que se ha convertido en el líder mundial en capacidad instalada de paneles solares FV.*

Está previsto que las tarifas subvencionadas se reduzcan con el tiempo, a medida que los costes de las energías renovables se vuelven más competitivos frente a las fuentes tradicionales de energía. En Alemania ya ha comenzado una reducción en la tasa de las tarifas subvencionadas. Un análisis de 2008 realizado por la Unión Europea sobre diferentes maneras de aumentar la porción de renovables en las reservas de electricidad, descubrió que “Los regímenes de tarifas subvencionadas bien adaptados generalmente son los esquemas de respaldo más eficientes y efectivos para promover la electricidad renovable” (Commission of the European Communities 2008, p. 3).

Los subsidios pueden tomar la forma de pagos directos o de otras disposiciones favorables tales como créditos fiscales o préstamos con bajo interés. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte de los subsidios actuales van hacia los combustibles fósiles. Sin embargo, los subsidios tienen más sentido si se usan en tecnologías en desarrollo que en tecnologías maduras. Los subsidios para energías renovables pueden promover economías de escala que reducen los costes de producción.

Al igual que las tarifas subvencionadas, los subsidios a la producción pueden ser gradualmente reducidos a medida que las energías renovables se vuelven más competitivas. Una desventaja de los subsidios es que no hacen nada para fomentar el ahorro, que ofrece un potencial enorme. Los subsidios pueden ser mal direccionados si el problema inmediato no es que necesitamos más energías renovables, sino que necesitamos quemar menos combustibles fósiles y emitir menos dióxido de carbono. Por otro lado, desde un punto de vista político, son más fáciles de establecer los subsidios que nuevos impuestos.

**Los objetivos de las energías renovables** establecen metas para el porcentaje de la energía o la electricidad total obtenida a partir de las fuentes renovables. Más de 60 países han establecido objetivos de energías renovables. La Unión Europea ha establecido el objetivo del 20% de la energía total a partir de renovables para 2020, con objetivos diferentes para cada país miembro. Los objetivos de 2020 incluyen metas del 18% para Alemania, 23% para Francia, 31% para Portugal y 49% para Suecia. Si bien los Estados Unidos no tiene un objetivo nacional para las energías renovables, la mayoría de los estados sí han establecido sus metas. Algunos de los objetivos más ambiciosos son Maine (40% para 2017), Minnesota (25% para 2025), Illinois (25% para 2025), New Hampshire (24% para 2025), y Connecticut (23% para 2020) (Wiser and Barbose 2008).

Los gobiernos pueden promover la *eficiencia energética* estableciendo **estándares de eficiencia energética**. Un ejemplo son los estándares de consumo de combustible. En 2011 el estándar de consumo de combustible de los Estados Unidos era de 30 millas por galón (MPG) para automóviles de pasajeros y de 24 MPG para camiones livianos, una categoría que incluye camionetas (pick-up), furgonetas y vehículos utilitarios deportivos. Después de unos 20 años en los que los estándares de consumo de combustible fueron escasamente modificados, en 2011 la Administración Obama anunció nuevos estándares que aumentarían la eficiencia promedio de combustible a 54,5 MPG en 2025. Comparado con los modelos de vehículos del año 2010, el ahorro total para los vehículos del año 2025 sumaría más de 8.000 \$ durante la vida útil del vehículo. Existen otros estándares de consumo de energía para los edificios, los electrodomésticos, los equipos electrónicos y las bombillas.

**El etiquetado de eficiencia** informa a los consumidores acerca de la eficiencia energética de varios productos. Por ejemplo, en los Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía crearon el programa Energy Star. Los productos que cumplen con estándares de alta eficiencia, por encima de los

requerimientos mínimos, pueden obtener la etiqueta Energy Star. Alrededor del 75% de los consumidores que compraron productos Energy Star afirmaron que la etiqueta había sido un factor importante en su decisión de compra. En 2011, el ahorro de energía gracias a los productos Energy Star alcanzó unos 23.000 millones de \$ (EPA 2011).

Incluso con las etiquetas informativas, muchos consumidores no compran productos de alta eficiencia porque los costes iniciales pueden ser más altos. Por ejemplo, las lámparas LED y las bombillas fluorescentes compactas cuestan más que las bombillas tradicionales incandescentes. Sin embargo, los ahorros de energía logrados gracias a las lámparas eficientes significan que el coste adicional será recuperado en un período de tiempo relativamente corto, normalmente en menos de un año. El problema es que la gente generalmente tiene altas **tasas de descuento** implícito, centrando la atención en el coste inicial sin considerar los ahorros a largo plazo (ver Cuadro 8). Probablemente serían necesarias educación y promoción de un cambio cultural hacia un pensamiento a más largo plazo para lograr que los hábitos de compra de los consumidores sean más consistentes con la conservación de los recursos.

#### **Cuadro 8: Tasas de descuento implícito y eficiencia energética**

Un gran problema a la hora de aumentar la eficiencia energética de los electrodomésticos surge de las altas tasas de descuento implícitas. Supongamos que un consumidor puede comprar un refrigerador estándar por 500 \$ y un modelo energéticamente eficiente por 800 \$. El modelo eficiente le hará ahorrar al consumidor 15 \$ por mes en coste de energía. Desde un punto de vista económico, podemos decir que el rendimiento de los 300 \$ adicionales invertidos en el modelo eficiente sería:  $15 \$ \times 12 = 180 \$/\text{año}$ ; lo cual genera una tasa interna de retorno del 50% (un equivalente métrico de la rentabilidad en un activo financiero).

Cualquier persona a la que le ofrecieran una inversión en bolsa que le diera una rentabilidad anual garantizada del 50% lo consideraría una tremenda oportunidad. Pero es muy probable que el comprador del refrigerador rechace la oportunidad de esta fantástica rentabilidad. La razón es que esta persona le dará mayor importancia a la decisión inmediata de gastar 500 \$ contra 800 \$ y, por lo tanto, elegirá el modelo más barato. Podríamos decir que el consumidor está utilizando implícitamente una tasa de descuento de más del 50% para tomar esta decisión. Una conducta de consumidor difícil de justificar económicamente, pero muy común.

## RESUMEN

La energía es un input fundamental para los sistemas económicos. La actividad económica actual depende enormemente de los combustibles fósiles, incluyendo el petróleo, el carbón y el gas natural. Estos combustibles son no-renovables. Las energías renovables, como la hidráulica, la eólica y la solar representan actualmente menos del 10% de la energía mundial.

Hay muchas fuentes de energías renovables disponibles y han sido utilizadas durante siglos. La mayoría de las renovables tienen menos disponibilidad y/o tienen costes más altos que los combustibles fósiles usados en el pasado reciente. Los costes de las fuentes de energías renovables son atribuibles, en parte, a sus características inherentes; particularmente a sus bajas relaciones de energía neta, su disponibilidad intermitente y su intensidad de capital. El desarrollo de nuevas tecnologías reducirá los costes de las energías renovables, pero es posible que no los vuelva competitivos con respecto a los precios del mercado de los combustibles fósiles en un futuro cercano, salvo que se tengan en cuenta las externalidades de los combustibles fósiles.

La velocidad de la transición hacia las energías renovables estará altamente condicionada por las políticas escogidas. Reformar los subsidios a los combustibles fósiles e instituir impuestos pigouvianos son dos políticas que pueden provocar resultados económicamente más eficientes. Otras potenciales políticas incluyen aumentar el presupuesto para investigación y desarrollo en energía, las tarifas subvencionadas y los objetivos en porcentajes de energías renovables. Las políticas públicas también pueden ayudar aportando capital para proyectos de energías renovables y ofreciendo una red eléctrica robusta para poder trasladar la energía a través de grandes distancias. Reducir los costes de la energía solar FV y los costes de los dispositivos de almacenamiento de energía (por ej., las baterías) son dos áreas clave del desarrollo tecnológico que podrían reducir significativamente los costes de las energías renovables en el largo plazo.

Con costes energéticos más altos, los edificios, las redes de transporte y las fábricas serían rediseñadas para utilizar menos energía. Gran parte de la transición hacia energías renovables probablemente no se logrará con el hallazgo de nuevas fuentes de energía, sino más bien rediseñando los sistemas para que consuman menos energía. Esto estaría estimulado por los elevados costes de las energías renovables, ya que el ahorro energético llega al óptimo si el coste marginal del ahorro es igual al coste marginal de la energía renovable. La energía solar FV está disponible de forma sostenible en cantidades casi ilimitadas, siendo su coste marginal el límite superior para todos los costes de la energía.

La transición hacia la energía renovable es inevitable, así que la cuestión reside en cómo manejarla adecuadamente, minimizando el coste total de los servicios de energía más el coste de los daños causados por la utilización de energía. Una combinación entre ahorro y fuentes de energías renovables reemplazará finalmente al sistema actual de energía dominado por los combustibles fósiles. El cambio climático sugiere que esto debería suceder más pronto que tarde.

## CUESTIONARIO

1. ¿En general en qué se diferencian las fuentes de energías renovables de los combustibles fósiles? Es decir, ¿cuáles son algunas características comunes de las fuentes de energías renovables que les diferencian de los combustibles fósiles usados en el pasado?
2. Explique el principio de equimarginalidad con sus propias palabras. ¿Cómo se aplicaría al desarrollo de una cartera de fuentes de energías renovables en su región?
3. ¿Es posible que el ahorro de energía sea más importante en una economía de energías renovables que en el pasado? Explique.
4. La energía hidráulica es actualmente la fuente más importante de generación de electricidad renovable del mundo y tiene potencial de expansión. En algunas partes del mundo, una cartera de energías renovables podría estar basada sólo en la energía hidráulica y en el ahorro de energía. Sin embargo, la energía hidráulica también es polémica, principalmente debido a las externalidades negativas asociadas. Describa algunas de estas externalidades. ¿Usted cree que deberían desarrollarse más proyectos hidráulicos en el mundo? ¿Cómo decidiría si un proyecto hidráulico específico debe ser desarrollado o no?
5. ¿Por qué tienen las políticas públicas un rol tan predominante en la promoción del uso de energías renovables y en acelerar la transición hacia una energía renovable? ¿Qué tipos de políticas públicas cree que serán las más efectivas?

## EJERCICIOS

1. El uso de la energía puede expresarse en un molesto número de diferentes unidades; pero, por suerte, cualquier unidad de energía puede ser convertida a cualquier otra unidad. Para comparar los verdaderos costes de la energía, busque en internet los precios normales, el contenido energético y los factores de conversión, y exprese los siguientes costes en \$/kWh brutos (para obtener los \$/kWh netos, deberíamos tomar en cuenta también la eficiencia, que variaría según el uso):

- electricidad comprada a una compañía de servicios de su región
- gas natural
- combustible para calefacción del hogar (fuel oil #2)
- gasolina en los Estados Unidos
- gasolina en algún país europeo

(Pista: es posible que deba buscar el contenido energético de los combustibles en Btu, para luego convertir de Btu a kWh. Vea, por ejemplo <http://www.onlineconversion.com/energy.htm>)

2. La disponibilidad hidráulica puede ser calculada como:

$$kW = 9,8\eta QH$$

donde  $Q$  es el caudal en  $m^3/seg$ ,  $H$  es la altura en metros, y  $\eta$  es la eficiencia del sistema general.

Además,

$$kWh \text{ Anuales} = kW \times \text{horas operativas anuales}$$

Si un salto de agua tiene un caudal promedio de  $5 m^3/seg$ , una altura de 10 metros y la eficiencia general del sistema ( $\eta$ ) es 0,8, ¿cuánta energía hay disponible en el salto de agua (en kW)? Si el coeficiente de capacidad es 0,7, ¿cuánta energía puede generarse en un año (en kWh)?

3. El pasto varilla (*panicum virgatum*) que crece en los Estados Unidos puede producir alrededor de 7,5 toneladas de biomasa por acre y año, con un rendimiento de alrededor de 80 galones de etanol por tonelada. Cada galón de etanol tiene alrededor del 67% de la energía que tiene un galón de gasolina. Averigüe cuál es el consumo anual total de gasolina en los Estados Unidos y la superficie total de tierra de cultivo de los Estados Unidos, y calcule qué porcentaje de esa tierra de cultivo se necesita para cultivar pasto varilla de manera que la gasolina sea reemplazada completamente por el etanol. ¿Qué efectos económicos podrían producirse si se obtuviera una gran proporción del suministro de combustible a partir del etanol del pasto varilla? (Pista: podría ser más fácil resolver este problema en millones de galones y millones de acres)

Sitios de internet útiles: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=23&t=10>  
[http://www.census.gov/compendia/statab/cats/agriculture/farms\\_and\\_farmland.html](http://www.census.gov/compendia/statab/cats/agriculture/farms_and_farmland.html)

4. Para una fuente de energía con una producción constante de energía y sin costes de funcionamiento, el coste normalizado de energía (LCOE, por sus siglas en inglés) por kilovatio hora (kWh) puede calcularse de la siguiente manera:

$$\frac{\text{coste de capital anualizado}}{\text{producción anual de kWh}}$$

El coste de capital anualizado es similar al pago de una hipoteca, un coste anual que incluye el pago del capital inicial y el interés (o coste de oportunidad del capital) durante la vida de un proyecto. Esto puede calcularse así:

$$\text{Annualized capital cost} = K \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1}$$

donde  $K$  es el coste de capital,  $r$  es un tipo de interés y  $T$  es la vida útil del proyecto.

a. Averigüe el coste normalizado de la electricidad para un sistema eléctrico solar con 5 kW de capacidad si el costo de capital del sistema es de 3.000 \$ por kW de capacidad, el tipo de interés es del 5%, el sistema dura 30 años y el coeficiente de capacidad es 0,15.

b. Averigüe el coste normalizado de la energía para una central hidráulica de 300 kW, si el coste de capital es de 5.000 \$ por kW de capacidad, la tasa de interés es del 5%, el sistema dura 40 años, el coeficiente de capacidad es 0,70 y, para simplificar, asumimos que no hay costes de funcionamiento (los costes de funcionamiento de la energía hidráulica de pequeña escala suelen ser bajos, aunque mayores que cero).

## REFERENCIAS

- Acker, F. 2009. "Taming the Yangtze." *Engineering and Technology Magazine*.
- Ailworth, E. 2012. *NStar deal with Cape Wind gets OK*. *Boston Globe*.
- Badcock, J. and M. Lenzen. 2010. "Subsidies for Electricity-Generating Technologies: A Review." *Energy Policy* 38: 5038-5047.
- Battisti, R. and A. Corrado. 2005. "Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology." *Energy* 30: 952-967.
- Blok, K., P. van Breevoort, L. Roes, R. Coenraads and N. Muller. 2008. *Global status report on energy efficiency 2008*. Renewable Energy and Energy Efficiency Partnerships. [www.reeep.org](http://www.reeep.org)
- Butler, D. 2004. "Energy: Nuclear power's new dawn." *Nature* 429(6989): 238-240.
- Cardwell, D. 2014. "Buying into Solar Power, No Roof Access Needed." *The New York Times*.
- Cardwell, D. and M. L. Wald. 2014. "A Huge Solar Plant Opens, Facing Doubts About Its Future." *The New York Times*.
- Charles, C. and P. Wooders. 2011. *Subsidies to Liquid Transport Fuels: A Comparative Review of Estimates*. International Institute for Sustainable Development.
- Cleveland, C. J. 1991. "Natural resource scarcity and economic growth revisited: economic and biophysical perspectives". In R. Costanza, Ed., *Ecological Economics*. New York, Columbia University Press.
- Cleveland, C. J. 2005. "Net energy from oil and gas extraction in the United States." *Energy* 30: 769-782.
- Commission of the European Communities. 2008. *The Support of Electricity from Renewable Energy Sources, SEC(2008) 57* Brussels.
- Denholm, P. and R. M. Margolis. 2008. "Land-use requirements and the per-capita solar footprint for photovoltaic generation in the United States." *Energy Policy* 36(3531-3543).
- DOE. 2012. "Energy Department Report Finds Major Potential to Increase Clean Hydroelectric Power." <http://energy.gov/articles/energy-department-report-finds-major-potential-increase-clean-hydroelectric-power>
- DOE. 2012. *Photovoltaic Pricing Trends: Historical, Recent, and Near-Term Projections*. United States Department of Energy. <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56776.pdf>
- Eggertsson, H., I. Thorsteinsson, J. Ketilsson and A. Loftsdottir. 2010. *Energy Statistics in Iceland 2010*. Reykjavik: Orkustofnun, National Energy Authority.
- EIA. 2012. "DOE provides detailed offshore wind resource maps." *Today in Energy*.
- EIA. 2013. *Updated capital cost estimates for utility scale electricity generating plants*. Energy Information Administration, Washington D.C. <http://www.eia.gov/forecasts/capitalcost/>
- Ellis, J. 2010. *The Effects of Fossil-Fuel Subsidy Reform: A Review of Modelling and Empirical Studies*. International Institute for Sustainable Development.
- EPA. 2011. *Energy Star overview of 2011 achievements*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Farrell, A. E., R. J. Pelvin and B. T. Turner. 2006. "Ethanol can contribute to energy and environmental goals." *Science* 311: 506-508.
- Goldemberg, J. 2007. "Ethanol for a sustainable energy future." *Science* 315: 808-810.
- Grimes, R. W. and W. J. Nuttall. 2010. "Generating the option of a two-stage nuclear renaissance." *Science* 329: 799-803.

- Hall, C. A. S. 2008. "Reports published on The Oil Drum." from [www.theoil Drum.com/node/3786](http://www.theoil Drum.com/node/3786), [www.theoil Drum.com/node/3800](http://www.theoil Drum.com/node/3800), [www.theoil Drum.com/node/3810](http://www.theoil Drum.com/node/3810), [www.theoil Drum.com/node/3839](http://www.theoil Drum.com/node/3839), [www.theoil Drum.com/node/3877](http://www.theoil Drum.com/node/3877), [www.theoil Drum.com/node/3910](http://www.theoil Drum.com/node/3910), [www.theoil Drum.com/node/3949](http://www.theoil Drum.com/node/3949).
- Hall, C. A. S., C. J. Cleveland and R. Kaufmann. 1986. *Energy and resource quality: the ecology of the economic process*. New York: Wiley.
- Haymes, E. M. and W. C. Byrnes. 1993. "Walking and running energy expenditure estimated by Caltrac and indirect calorimetry." *Medicine & Science in Sports and Exercise* 25(12): 1365-1369.
- IEA. 2007. *Renewables in Global Energy Supply*. International Energy Agency and Organization for Economic Cooperation and Development.
- IEA. 2010. *Renewable energy essentials: hydropower*. International Energy Agency.
- IEA. 2011c. *World Energy Outlook 2011 Factsheet*. International Energy Agency, Paris.
- IEA. 2011d. *Joint Report by IEA, OPEC, OECD and World Bank on Fossil-Fuel and Other Energy Subsidies: An Update of the G20 Pittsburgh and Toronto Commitments*. International Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, Organization of the Petroleum Exporting Countries, and the World Bank
- IEA. 2012. *Technology roadmap: bioenergy for heat and power*. International Energy Agency, Paris.
- IEA. 2013. *Key World Energy Statistics*. International Energy Agency.
- International Center for Technology Assessment. 1998. *The Real Price of Gasoline*. Report No. 3: An Analysis of the Hidden External Costs Consumers Pay to Fuel their Automobiles.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jacobson, M. Z. and M. A. Delucchi. 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.
- Jacobson, M. Z. and M. A. Delucchi. 2011b. "Providing all global energy with wind, water, and solar power, part II: reliability, system and transmission costs, and policies." *Energy Policy* 39: 1170-1190.
- Kelty, M. J., A. W. D'Amato and P. K. Barten. 2008. *Silvicultural and ecological considerations of forest biomass harvesting in Massachusetts*. University of Massachusetts, Amherst MA.
- Keoleian, G. A. and T. A. Volk. 2005. "Renewable energy from willow biomass crops: life cycle energy, environmental, and economic performance " *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(5): 385-406.
- Kharecha, P. A. and J. E. Hansen. 2013. "Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power." *Environmental science & technology* 47(9): 4889-4895.
- Kitson, L., P. Wooders and T. Moerenhout. 2011. *Subsidies and External Costs in Electric Power Generation: A Comparative Review of Estimates*. International Institute for Sustainable Development.
- Kubiszewski, I., C. J. Cleveland and P. K. Endres. 2010. "Meta-analysis of net energy return for wind power systems." *Renewable Energy* 35: 218-225.
- Lazard. 2009. "Levelized cost of energy analysis--version 3.0."

- Lenzen, M. 2008. "Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: a review." *Energy Conversion and Management* 49: 2178-2199.
- Marques, J. G. 2010. "Evolution of nuclear fission reactors: third generation and beyond." *Energy Conversion and Management* 51: 1774-1780.
- Morales, A. 2010. *Fossil Fuel Subsidies Are Twelve Times Renewables Support*. Bloomberg.
- Murphy, D. J. and C. A. S. Hall. 2010. "Review: energy return on investment." *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185: 102-118.
- National Action Plan for Energy Efficiency. 2006. *National action plan for energy efficiency*.
- National Action Plan for Energy Efficiency. 2008. *National action plan for energy efficiency vision for 2025: a framework for change*. Environmental Protection Agency and NREL.
- NREL. 2005. *Renewable energy cost trends*. National Renewable Energy Laboratory. [http://www.geni.org/globalenergy/library/energytrends/renewable-energy-cost-trends/renewable-energy-cost\\_curves\\_2005.pdf](http://www.geni.org/globalenergy/library/energytrends/renewable-energy-cost-trends/renewable-energy-cost_curves_2005.pdf)
- NREL. 2008. "Photovoltaic solar resource: flat plate tilted south at latitude." from [http://www.nrel.gov/gis/images/map\\_pv\\_us\\_annual10km\\_dec2008.jpg](http://www.nrel.gov/gis/images/map_pv_us_annual10km_dec2008.jpg).
- Odgen, J. M., R. H. Williams and E. D. Larson. 2004. "Societal Lifecycle Costs of Cars with Alternative Fuels/Engines." *Energy Policy* 32: 7-27.
- Owen, A. D. 2006. "Renewable energy: externality costs as market barriers." *Energy Policy* 34: 632-642.
- Parry, I. W. H. and K. A. Small. 2005. "Does Britain or the United States Have the Right Gasoline Tax?" *American Economic Review* 95(4): 1276-1289.
- Pew Charitable Trusts. 2010. *Who's Winning the Clean Energy Race? Growth, Competition, and Opportunity in the World's Largest Economies*, Washington, D.C.
- Pimentel, D., M. Herz, M. Glickstein, M. Zimmerman, R. Allen, K. Becker, J. Evans, B. Hussain, R. Sarsfeld, A. Grosfeld and T. Seidel. 2002. "Renewable energy: current and potential issues." *BioScience* 52(12): 1111-1120.
- Rosenthal, E. 2010. *Portugal Gives Itself a Clean-Energy Makeover*. *The New York Times*.
- Snyder, B. and M. J. Kaiser. 2009. "Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy." *Renewable Energy* 34: 1567-1578.
- Stone, R. 2008. "Three gorges dam: into the unknown." *Science* 321: 628-632.
- The Citizen. 2011. *Countries assess safety of nuclear power plants*. Dar es Salaam.
- Wiser, R. and G. Barbose. 2008. *Renewables Portfolio Standards in the United States: A Status Report with Data Through 2007*. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Worldwatch Institute. 2014. "Vital Signs." from <http://vitalsigns.worldwatch.org>.
- Wu, J., J. Huang, X. Han, X. Gao, F. He, M. Jiang, Z. Jiang, R. B. Primack and Z. Shen. 2004. "The three gorges dam: an ecological perspective." *Frontiers in Ecology and the Environment* 2(5): 241-248.
- Yandle, B., M. Bhattarai and M. Vijayaraghavan. 2004. "Environmental Kuznet's curves: a review of findings, methods, and policy implications." *PERC (?)* 2: 1-38.

## RECURSOS ADICIONALES

1. [http://www.eia.gov/](http://www.eia.gov) Sitio web de la Administración de Información de Energía, una división del Departamento de Energía de los Estados Unidos que ofrece gran cantidad de información acerca de la demanda, el suministro, las tendencias y los precios de la energía.
2. <http://www.cnie.org/nle/crsreports/energy> Acceso a informes y boletines informativos sobre energía publicados por el Servicio de Investigaciones del Congreso.
3. <http://www.nrel.gov/> El sitio web del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Colorado. El NRE (por sus siglas en inglés) conduce investigaciones acerca de tecnologías de energías renovables, incluyendo las energías solar, eólica, de biomasa y de pilas de combustible.
4. [www.rmi.org/](http://www.rmi.org/) Sitio web del Rocky Mountain Institute, instituto sin fines de lucro que “fomenta el uso eficiente y restaurador de los recursos para crear un mundo más seguro, más próspero y sustentador de la vida”. El objetivo principal del RMI ha sido promover el aumento de la eficiencia energética en las industrias y en los hogares.
5. <http://www.eren.doe.gov/> Sitio web de Red de Eficiencia Energética y Energías Renovables del Departamento de Energía de los Estados Unidos. El sitio incluye una gran cantidad de información acerca de la eficiencia energética y las fuentes de energías renovables, así como cientos de publicaciones.
6. <http://www.iea.org/> Sitio web de la Agencia Internacional de Energía, una “organización autónoma que trabaja para asegurar una energía fiable, asequible y limpia para sus 28 países miembros y más”. Si bien algunos datos están disponibles sólo para los suscriptores, otros datos se encuentran disponibles de forma gratuita, así como el acceso a publicaciones informativas como el informe anual “Key World Energy Statistics” (Estadísticas Clave de la Energía Mundial).
7. <http://www.energystar.gov/> Sitio web del programa Energy Star, que incluye información acerca de cuáles productos cumplen con las directrices de la eficiencia energética.

## GLOSARIO

**almacenamiento de agua bombeada:** un método para almacenar energía en el cual la energía es en primera instancia usada para bombear agua hacia un nivel más alto (por ejemplo en un lago de altura) y luego la energía es recuperada cuando el agua se deja caer hacia su nivel original. El almacenamiento de agua bombeada está basado en la tecnología hidráulica.

**bomba de calor:** un dispositivo que utiliza energía mecánica y tecnología de refrigeración para mover calor de una zona más fría a una zona más caliente (opuestamente a la circulación natural del calor), normalmente para calentar edificios y agua para uso doméstico.

**cambio climático:** cambios en el clima global, incluyendo la temperatura, las precipitaciones y la frecuencia e intensidad de las tormentas, que surge de cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

**capital social:** una cantidad existente de recursos productivos, que puede incluir capital manufacturado, capital humano y capital natural.

**caudal:** en un contexto de energía hidráulica, la cantidad de agua de un río o corriente que pasa por un punto durante un período de tiempo específico, normalmente medido en metros cúbicos por segundo o en pies cúbicos por segundo.

**coeficiente de capacidad:** para un dispositivo o central de generación de electricidad, la relación entre la energía producida en un período de tiempo y el máximo potencial de producción de energía en ese período de tiempo. Un factor de capacidad suele ser menor a uno, ya que la mayoría de las centrales generadoras de electricidad no operan al máximo potencial de forma continua debido a la falta de energía de la fuente (por ejemplo, del sol o del viento), los tiempos necesarios de mantenimiento, la falta de demanda, etc.

**coste de oportunidad:** un término económico para definir el valor de la mejor alternativa descartada para obtener algo.

**coste marginal:** el coste de producir una unidad adicional de un producto o servicio.

**coste normalizado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés):** el coste promedio de producir energía (generalmente electricidad) a partir de una fuente durante la vida útil de la fuente, incluyendo el coste de capital, el coste del combustible (si lo hay) y todos los demás costes de funcionamiento.

**desgravaciones por agotamiento:** una deducción fiscal por extraer recursos naturales, tales como los combustibles fósiles.

**energía de la biomasa:** energía derivada de fuentes biológicas como árboles, cultivos y desechos animales, que puede ser utilizada para calefacción, para convertir en combustibles líquidos o para generar electricidad.

**energía eólica:** energía derivada del aire en movimiento. La energía eólica suele darse en forma de electricidad, aunque también puede ser usada para bombear agua o generar calor.

**energía eólica marina:** energía eólica derivada de molinos de viento ubicados en el océano o en otra superficie grande de agua.

**energía fotovoltaica (FV):** una forma de energía solar, en la cual la electricidad es producida por la luz del sol que cae sobre células semiconductoras de silicio.

**energía geotérmica:** energía derivada del calor de la tierra, que puede ser usada para calentar o para la producción de electricidad.

**energía hidráulica:** energía derivada de caídas de agua, normalmente en forma de electricidad.

**energía maremotriz (o mareomotriz):** energía derivada de los caudales de agua entrantes y salientes de la marea, normalmente en la forma de electricidad.

**energía renovable:** cualquier energía que venga de una fuente inagotable. Las más típicas son la energía solar, la eólica, la hidráulica, la geotérmica y la de biomasa.

**energía solar:** energía derivada del sol, ya sea directa o indirectamente (por ejemplo, a través de la producción de biomasa vegetal), normalmente en la forma de calor o electricidad.

**estándar de eficiencia energética:** un enfoque de regulación ambiental que establece un estándar mínimo de eficiencia, tal como el uso de electricidad para un electrodoméstico o el uso de combustible para un vehículo.

**etiqueta de eficiencia:** una etiqueta que indica la eficiencia energética de un producto frente a otros productos similares, como una etiqueta en un electrodoméstico mostrando el uso anual de energía.

**externalidad negativa:** impacto negativo de una transacción de mercado que afecta a personas que no están involucradas en la transacción.

**externalidad positiva:** impacto positivo de una transacción de mercado que afecta a personas que no están involucradas en la transacción.

**impuesto pigouviano:** un impuesto por unidad igual al daño externo causado por una actividad; por ejemplo, un impuesto por tonelada de contaminación emitida, que iguala al daño externo de una tonelada de contaminación.

**intermitencia:** una característica de las fuentes de energía como el viento y el sol, que se encuentran disponibles en diferentes cantidades y en diferentes momentos.

**internalizar externalidades:** usar políticas tales como impuestos o comisiones para agregar los costos externos a los precios de mercado.

**kilovatio (kW):** un flujo de energía de 1000 vatios.

**kilovatio por hora (kWh):** una cantidad de energía igual a un flujo de 1 **kilovatio (kW)** por 1 hora, o 2 kW por  $\frac{1}{2}$  hora, o 0,5 kW por 2 horas, etc.

**ley de la demanda:** el principio económico según el cual cuando el precio de un producto o servicio sube, la cantidad demandada baja. La ley de la demanda se aplica a la mayoría de los productos y servicios de casi todos los mercados.

**medidores inteligentes de electricidad:** dispositivos para medir la electricidad que registran el uso total de electricidad y también recolectan datos como el uso de electricidad a lo largo del tiempo. Los medidores inteligentes de electricidad pueden tener también capacidades de comunicación y la posibilidad de controlar cargas; es decir, de apagar equipos eléctricos que tengan baja prioridad en los momentos en que la electricidad es cara o no se encuentra disponible.

**objetivos de la energía renovable:** disposiciones que establecen los porcentajes mínimos de energía que debe ser obtenida a partir de fuentes de energías renovables.

**fuga:** (en el contexto del uso de energía) el efecto que la eficiencia mejorada tiene al promover un mayor uso de energía como resultado de los costes más bajos, neutralizando, en consecuencia, parte de la reducción del uso de energía derivada del original aumento de eficiencia.

**principio de equimarginalidad:** el principio económico según el cual el coste total de producción es minimizado cuando los costes marginales de diferentes opciones de producción son iguales. Si los costes marginales de diferentes opciones no fueran iguales, sería posible reducir el coste total cambiando alguna de las producciones a una alternativa de menor coste.

**redundancia de fuentes de energía:** capacidad de producción de energía adicional o de respaldo para usar cuando otras fuentes de generación no están disponibles, por ejemplo, generadores alimentados con gas natural y que son usados cuando la energía eólica no está disponible o es insuficiente.

**relación de energía neta:** la relación entre la energía utilizable obtenida y la energía utilizada en producir dicha energía. Una fuente de energía útil debe tener una relación de energía neta mayor a uno.

**salto:** en un contexto de energía hidráulica, la distancia vertical de caída del agua, normalmente medida en metros o pies.

**servicios ecosistémicos:** servicios beneficiosos ofrecidos libremente por la naturaleza, tales como la protección contra inundaciones, la purificación del agua y la formación de los suelos.

**tarifas subvencionadas:** una política para otorgar a los productores de energías renovables contratos de largo plazo para comprarles energía a un precio preestablecido, normalmente basado en el coste de la producción más un incentivo adicional.

**tarifas variables de electricidad:** diferentes tarifas de electricidad para diferentes momentos del día, o para momentos con mayor o menor disponibilidad de energía, para reflejar, por ejemplo, la demanda cambiante o las condiciones de reserva de energías renovables.

**tasa de descuento:** la tasa anual a la que son descontados (o reducidos) los futuros beneficios o costes en relación con los beneficios o costes del presente. Una tasa de descuento refleja la diferencia de valor entre obtener algo hoy y tener que esperar para obtener lo mismo en el futuro.

**transición energética:** un cambio general de las fuentes de energía utilizadas por la sociedad; por ejemplo, de la madera a los combustibles fósiles en el pasado, y de los combustibles fósiles a las fuentes de energías renovables ahora.

**valor actualizado:** el valor actual de un coste o ingreso futuro, o de un conjunto de costes o ingresos futuros. Se utiliza una tasa de descuento para convertir el valor futuro en valor actualizado.