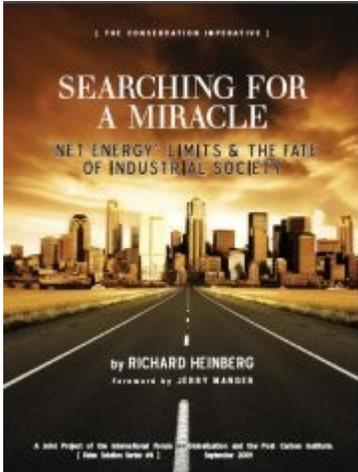


En busca de un milagro: Los límites de la ‘energía neta’ y el destino de la sociedad industrial

by Jerry Mander & Richard Heinberg



This is a translation of [Searching for a Miracle: 'Net Energy' Limits & the Fate of Industrial Society](#), a report originally released in September 2009 by the Post Carbon Institute & International Forum on Globalization. Many thanks to volunteer translator Carlos Valmaseda, and reviewer Susana Martinez.

Agradecimientos

Este documento no hubiera sido posible sin la gran ayuda de varias personas. Quiero dar las gracias particularmente al Prof. Charles Hall de la Universidad de Syracuse, quien ha sido un pionero en el desarrollo del concepto de « energía neta » (EROEI) que se encuentra en el corazón de este informe. También hemos aprovechado directamente su investigación publicada en varios aspectos del documento. Jerry Mander y Jack Santa Barbara del Foro Internacional sobre la Globalización ayudaron a concebir este proyecto hace varios años y siguieron implicados durante su redacción, leyendo varios borradores y ofreciendo detalladas sugerencias para su edición, forma y escritura. El Dr. David Friedly, científico de plantilla del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, leyó un último borrador y dio valiosos consejos técnicos. Suzanne Doyle proporcionó la necesaria investigación y comprobación de hechos, y redactó las notas a pie de página así como diversos párrafos. Alexis Halbert y Alina Xu del FIG recopilaron muchos de los materiales de investigación sobre energía neta, y participaron en alguna investigación original, y Victor Menotti del FIG ofreció importante información sobre el estado de las negociaciones sobre el clima. También tenemos un especial agradecimiento para Asher Miller, el colega que tanto apoyo nos da, y ED del Post Carbon Institute. Mis más profundo agradecimiento a todos ellos. Finalmente, mi reconocimiento para los pioneros que comprendieron por primera vez las muy profundas dimensiones de las relaciones entre energía y sociedad: sin sus trabajos anteriores este documento ni siquiera se hubiera podido imaginar: Frederick Soddy, Howard Odum y M. King Kubbert.- Richard Heinberg.

—
Diseño: Daniela Sklan

Editor: Jerry Mander

Contribuciones editoriales: Jack Santa Barbara, Anne Leonard, Victor Menotti, Alexis Halbert, Alina Xu

Lector de pruebas: Elizabeth Garsonnin

Diagramas, Tablas, y otras investigaciones: Suzanne Doyle

Asistencia adicional: Kate Damasco, Claire Greensfelder, April McGill

Foto de la cubierta: iStock

SUMARIO

Prólogo: ¿Cuál es la salida? por Jerry Mander

Uno: Visión general

Glosario de términos

¿Qué es la energía?

Dos: Nueve criterios clave: comparativa de los sistemas de energía y sus límites

- 1) Costes monetarios directos
- 2) Dependencia de recursos adicionales
- 3) Impacto ambiental
- 4) Posibilidad de renovación
- 5) Tamaño potencial o escala de contribución
- 6) Localización del recurso
- 7) Fiabilidad
- 8) Densidad energética
 - a) Densidad por peso (o gravimétrica)
 - b) Densidad por volumen (o volumétrica)
 - c) Densidad por área
- 9) Transportabilidad

Tres: El décimo criterio: "Energía neta" (EROEI)

Retorno de inversión (EROEI)

Reemplazo de la energía humana

El apogeo de los combustibles fósiles

Cómo la EROEI da forma a la sociedad

La EROEI limita las opciones energéticas

EROEI: Diferencia con la eficiencia

Evaluación de la energía neta: imprecisa pero esencial para la planificación

Cuatro: Valoración y comparación de dieciocho fuentes de energía

- 1) Petróleo
- 2) Carbón
- 3) Gas natural
- 4) Energía hidroeléctrica
- 5) Nuclear
- 6) Biomasa
- 7) Energía eólica
- 8) Solar fotovoltaica (FV)
- 9) Termal Sola activa (concentración)
- 10) Solar Pasiva
- 11) Energía geotérmica

- 12) Energía de los desechos
 - 13) Etanol
 - 14) Biodiesel
 - 15) Arenas asfálticas
 - 16) Esquistos bituminosos
 - 17) Energía mareomotriz
 - 18) Energía undimotriz
- Otras fuentes

Cinco: Hacia un futuro mix energético

Un proceso de eliminación
Portadores comunes: electricidad e hidrógeno
Almacenamiento y transmisión de la energía
Planes de transición

Seis: Los argumentos para la conservación

Referencias

Bibliografía

The International Forum on Globalization
The Post Carbon Institute

PRÓLOGO: ¿CUÁL ES LA SALIDA?

Por Jerry Mander - Foro Internacional sobre la Globalización

Este informe, un hito escrito por Richard Heinberg, constituye el cuarto número de la colección Falsas Soluciones publicadas a partir de 2006 por el Foro Internacional sobre la Globalización. Los anteriores informes son “La falsa promesa de los biocombustibles” del miembro de FIG Jack Santa Barbara, que fue el primero en predecir lo que sería confirmado un año más tarde en funestos estudios de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y las Naciones Unidas –que la loca carrera por los biocombustibles, especialmente el etanol de maíz, ya avanzada en 2006, causaría más problemas medioambientales, agrícolas y de hambre, que los que podría empezar a resolver. A pesar de esto, la política de los EEUU continúa favoreciendo los subsidios a los biocombustibles industriales.

La segunda publicación de la serie, producida en colaboración con el Institute for Policy Studies, fue « El manifiesto sobre transiciones económicas globales » -un esfuerzo colectivo entre 50 miembros asociados y de la dirección del FIG. Es esencialmente el borrador de un mapa de ruta para la obligatoria transformación de la sociedad industrial al reconocer los límites impuestos por las capacidades del planeta.

El tercer informe, « El auge y predecible caída de la agricultura industrial globalizada », fue escrito por la ex-directora ejecutiva del FIG, Debbie Barker. Este informe destrozaba la idea, siempre anunciada sin reparar en gastos, de que los sistemas de agricultura industrial son la mejor forma de

« alimentar a un mundo hambriento. »

En realidad lo cierto es todo lo contrario. La publicación expuso y amplió una mirada de conexiones poco reconocidas de la agricultura industrial con el avance del hambre, las migraciones mundiales y el cambio climático, entre otros efectos mortales.

Todas estas publicaciones gozan ahora de una amplia distribución. El informe que sigue, « En busca de un milagro : los límites de la ‘energía neta’ y el destino de la sociedad industrial », de nuestro amigo y colega de tanto tiempo Richard Heinberg, un miembro asociado del FIG y socio principal del Post Carbon Institute, es el primer uso de las nuevas técnicas de « valoración del ciclo vital de la tecnología » y en particular del análisis de « energía neta », para realizar comparativas en profundidad entre todos los esquemas de energía actualmente dominantes y los « alternativos » recientemente promocionados. Estos incluyen todos los sistemas renovables más importantes por los que actualmente se aboga. Por primera vez somos capaces de comprender plenamente hasta qué grado nuestras futuras opciones de sociedad están más limitadas de lo que pensábamos.

Con los combustibles fósiles desapareciendo con rapidez, y el suministro haciéndose cada vez más caro y problemático, las esperanzas se han vuelto hacia las fuentes renovables a las que pedimos que salven « nuestro estilo de vida » más o menos en su nivel actual.

Desgraciadamente, como veremos, la ganancia de « energía neta » de todos los sistemas alternativos – esto es, la cantidad de energía producida, comparada con la cantidad de energía (así como el dinero y los materiales) que se deben invertir para hacerla funcionar- es de lejos demasiado pequeña para empezar a sostener la sociedad industrial a sus niveles actuales. Son noticias muy sombrías y exigen grandes y rápidos ajustes de todas las partes, desde los gobiernos a las industrias e incluso las organizaciones medioambientales, algo que claramente hasta ahora no está a la vista. Hay, sin embargo, caminos viables hacia adelante, siendo el más importante y urgente la necesidad de un empuje de amplio espectro por la conservación; es solo una cuestión de realismo, flexibilidad, dedicación y algo más que un poco de humildad. Nuestro amado « estilo de vida » debe reconsiderarse y se deben apoyar alternativas más viables.

LA PUERTA EQUIVOCADA

Observamos cada día los inútiles procesos oficiales que se continúan desarrollando entre los gobiernos nacionales, así como las instituciones políticas y financieras globales, mitigando de boquilla el cambio climático y las catástrofes medioambientales relacionadas que van avanzando en el mundo. Estas crisis no son solo el cambio climático y la escasez inminente de combustibles fósiles, sino que incluyen también el agotamiento profundo de otros recursos clave, como agua dulce, suelos fértiles, vida oceánica, madera, minerales cruciales, biodiversidad y aire respirable, etc. Todas estas crisis están alcanzando puntos que requieren una actuación urgente, y son el resultado de valores y sistemas de funcionamiento equivocados.

Incluso las grandes esperanzas que alguna vez tuvimos de que los gobiernos del mundo se unirían para conseguir resultados positivos en algunos temas, por ejemplo, en las charlas sobre el cambio climático de las Naciones Unidas en Copenhague, así como en otras reuniones, se han demostrado tristemente vanas. Pero algunas cosas son incluso más claras: las instituciones globales, los gobiernos nacionales, e incluso muchos activistas sociales y medioambientales están llamando a la puerta. Individualmente y como grupo, no se han enfrentado a toda la gravedad y significado de la cuestión de la energía global (y los recursos). Continúan funcionando en gran parte con el mismo conjunto de suposiciones que todos

hemos tenido en el pasado siglo: que no serán necesarios cambios fundamentales sistémicos; que nuestro conjunto de problemas se puede resolver con innovación humana, ingenuidad y eficiencia técnica, junto a unos pocos cambios en nuestra elección de sistemas de energía.

Y lo más importante de todo, las instituciones imperantes siguen creyendo en la primacía y la eficacia del crecimiento económico como indicador clave del bienestar del sistema, incluso a la luz de unos recursos en continua disminución. No sería necesario, según este dogma, aceptar la realidad de que un crecimiento económico en continua expansión es en realidad un absurdo en un sistema finito, algo ridículo, y que pronto acabará incluso aunque los activistas no hagan nada para oponerse a él.

Tampoco la corriente dominante reconoce que los sistemas económicos, el capitalismo principalmente, que *exigen* tal crecimiento sin fin para su propia viabilidad, pueden estar condenados a no muy largo plazo. De hecho, ya están mostrando signos de colapso. ¿Y sobre cualquier necesidad de cambios sustanciales en las formas de vida persona, o controlar y *limitar* los hábitos de consumo material? Más bien se propone lo contrario; aumentar las ventas de coches, las « ayudas a la construcción de nuevas viviendas » y el incremento de la producción industrial siguen siendo los objetivos de nuestra economía, incluso con Obama, y los siguen celebrando cuando se producen, sin pensar para nada en las consecuencias medioambientales. No se fomentan los cambios en los marcos conceptuales que tengan en cuenta los ahora claramente visibles límites de la naturaleza, que es tanto la fuente raíz de todos los beneficios planetarios como el inevitable sumidero tóxico de nuestros hábitos excesivos. En esta visión dominante, con un pensamiento optimista y de autoengaño, hay también una entregada evasión de la necesidad de cualquier *redistribución* significativa de los recursos naturales cada vez más escasos hacia acuerdos más equitativos entre las naciones y los pueblos –para al menos mitigar ligeramente siglos de saqueo colonial y empresarial del Tercer Mundo-. ¿Y sobre la cuestión igualmente ignorada de la viabilidad continuada de un pequeño planeta que puede necesitar pronto tener que mantener 8-10 mil millones de personas? Algunos dicen que en realidad eso es algo *bueno*. Deberíamos pensar en estos miles de millones como nuevos consumidores que pueden ayudar a animar el crecimiento económico, como reza este argumento. Pero solo si encontramos unos cuantos planetas cercanos más, quizá en un universo paralelo en alguna parte, lleno de petróleo, gas, agua, minerales, madera, ricas tierras agrícolas y una atmósfera virginal.

La escala de la negación es impresionante. Porque como el análisis de Heinberg deja depresivamente claro, *no habrá NINGUNA combinación de soluciones energéticas alternativas que pueda permitir a largo plazo la continuación del crecimiento económico, o de sociedades industriales en su forma y escala actuales.* En última instancia las soluciones que buscamos desesperadamente no vendrán de un genio e innovación técnica cada vez mayor. Los mejores y potencialmente más exitosos caminos solo pueden venir de un agudo cambio hacia objetivos, valores y prácticas que enfatizen la conservación de recursos materiales y energía, la localización de más marcos económicos, y una reducción de la población gradual para mantenerse dentro de las capacidades del planeta.

LA FIESTA HA TERMINADO

El propósito central de todos nuestros documentos de la serie *Falsa solución*, incluido este, es dejar sentado que este completo conjunto de supuestos por los que nuestras instituciones han apostado colectivamente, es trágicamente inapropiado, y solo sirve para retrasar, en un momento crucial, unos cálculos muy importantes que deben ser afrontados inmediatamente. Enfáticamente *no* estamos contra las innovaciones y eficiencias donde puedan ser útiles. Pero estamos contra la gran falsa ilusión de que estas pueden solucionar todos los problemas, y estamos contra la tendencia a ignorar los límites sistémicos inherentes que afectan al suministro de energía, el suministro de recursos, y la Tierra misma.

Por ejemplo, las mayores predicciones tecno-utópicas de hoy, como el «carbón limpio», vía secuestro del carbono, y la «energía nuclear limpia», vía una nueva «4^a generación segura de diseño de reactores», ya se han demostrado como poco más que fantasías salvajes de las industrias del sector energético, haciendo proselitismo de estas opiniones con los políticos a los que, en otros momentos, también proporcionan fondos para sus campañas. No hay una evidencia convincente de que el carbón limpio, todavía en el reino de la ciencia ficción, se consiga *nunca*. Muy probablemente ocupará el mismo panteón de fantasía tecnológica que la fusión nuclear, por no hablar del teletransporte humano. En cualquier caso, todos los argumentos en favor de un carbón limpio, aunque sea absurdo, siguen ignorando lo que sucede en los lugares de los que procede. Si visitaran los Apalaches alguna vez, verían la actual desertificación por la eliminación de las cimas de las montañas, y sus ríos envenenados para obtener un carbón presuntamente pronto «limpio». La limpia energía nuclear presenta similares anomalías –actualmente no se contempla en ningún sitio una solución que esté cerca de ser práctica para el depósito de los residuos- incluso si los suministros de uranio no se estuviesen agotando tan rápidamente como los de petróleo. Hablar de la energía nuclear como «limpia» o «segura» es una clara señal de pánico mientras que, como a un vampiro, permitimos que se levante de nuevo de su tumba.

De acuerdo, sabemos que algún «progreso» tecnológico es útil, especialmente entre las energías alternativas renovables. Transformar el sistema hacia un muy promocionado y complejo mix de energías «renovables» como la eólica, la solar, la hidroeléctrica, la biomasa, la undimotriz y varias otras, ciertamente sería positivo y juntas podrían hacer contribuciones significativas, libres de muchos de los impactos medioambientales que han provocado los combustibles fósiles.

Pero como este informe explica de forma exquisita, por muy beneficiosos que esos cambios puedan ser, inevitablemente se quedarán muy cortos. *Nunca alcanzarán la escala o capacidad de sustituir un sistema de combustibles fósiles que, a causa de su (temporal) abundancia y bajo precio, ha hecho adictos a los países industrializados a una juerga de producción y consumo en el siglo XX que nos ha hecho llegar, y a todo el mundo, a esta difícil situación.* Como Richard Heinberg ha dicho tan elocuentemente antes, y usó como título de uno de sus libros más importantes, «la fiesta se ha acabado».

Así, esos suministros sin límite han resultado ser no tan ilimitados, o baratos, (o ya no eficientes), y nos ha dejado una única opción : afrontar la necesidad de una transformación sistémica a fondo de nuestra sociedad a una que enfatiza un *menor* consumo de recursos materiales y energía (conservación), menos globalización (enviando recursos y productos una y otra vez de forma derrochadora a través de océanos y continentes), y *más* localización que tiene incluidas eficiencias y ahorros por el mero hecho de ser una producción y uso local, y mucho menos procesamiento y distribución. Tales cambios deben combinarse con conseguir una población menor en todos los sectores mundiales, y el fomento de una evolución a valores personales, institucionales y nacionales que reconozcan (incluso celebren) los límites máximos de las capacidades de la Tierra, actualmente excedidos enormemente. Nada de esta visión ha contagiado los procesos de Copenhague, ni los del Congreso de los EEUU, ni los debates en los parlamentos nacionales; todo lo que este fuera de eso es solo una pantalla de humo corporativista, o pura negación de las realidades inminentes.

EL FACTOR ENERGÍA NETA

El informe de Richard Heinberg aboga por un examen metódico y una *comparativa* de las características más importantes inherentes a los sistemas clave de producción de energía de nuestro tiempo. Sus detallados resúmenes incluyen «análisis del ciclo de la vida» de las actuales fuentes de energía dominantes, tales como el petróleo, el gas, el carbón y la nuclear –las auténticas estructuras que forman la sociedad industrial, y nos han llevado a este grave momento histórico-. Cada uno de

estos métodos de obtención de energía está sufriendo ahora de escasez de suministro y aumento de costes, haciendo dudosa su futura aplicación. Heinberg explora entonces y compara todos los sistemas alternativos vivamente promocionados en nuestros días, como el eólico, solar, hidroeléctrico, geotérmico, biomasa y biocombustibles, incineración, energía undimotriz y otras. Delinea diez aspectos de cada sistema que lo incluyen todo, desde el coste monetario directo (*¿Nos lo podemos permitir?*), a su «escalabilidad» (*¿Se podrán aplicar sus beneficios a un volumen significativo?*). También incluye en su fórmula el impacto medioambiental; la localización de los recursos; su fiabilidad (*el viento no sopla continuamente ni brilla siempre el sol*); la densidad - ¿cómo es de compacta la fuente por unidad?--; la transportabilidad, etc.

El estándar *más* importante es el décimo aspecto de la lista de Heinberg –y al que está dedicado el grueso de este documento- : «energía neta», o la Energía Retornada sobre la Energía Invertida (EROEI), que se suele traducir en español como TRE [Tasa de Retorno Energético]. Heinberg explora este terreno analítico revolucionario cuidadosamente, basando su reportaje en la investigación innovadora de científicos líderes, entre los que destaca Charles Hall de la Universidad de Syracuse, quien ha sido el explorador pionero en la plena importación de la «energía neta» al futuro del industrialismo y el crecimiento económico.

Lo que se revela de este proceso es que las grandes ventajas que tuvieron una vez los sistemas de combustibles fósiles, que en su apogeo fueron capaces de producir enormes cantidades de *outputs* de energía con una inversión relativamente pequeña de *inputs* de energía o inversión en dólares –Heinberg establece una tasa de EROEI de alrededor de 100:1- ya no pueden acercarse a ese nivel. Y, por supuesto, continúan produciendo estragos en el planeta. Mientras tanto, los altamente prometedores sistemas de energía alternativos, que en muchos aspectos son, con diferencia, seguramente mucho más limpios que los combustibles fósiles, no pueden rendir de ninguna forma tasas de energía neta que se encuentren cerca de lo que es posible con los combustibles fósiles. En otras palabras, requieren para su funcionamiento un volumen significativo de *inputs* de energía que hacen que sus *outputs* de energía solo lleguen a un nivel muy modesto. Demasiado modesto, en realidad, para que puedan ser considerados un sustituto suficiente para los combustibles fósiles que están desapareciendo. De hecho, como hace notar Heinberg, no hay ninguna combinación de alternativas renovables que puedan competir con los días de gloria de los combustibles fósiles, hoy terminándose. ¿Qué presagia esto para la sociedad moderna? ¿Para el industrialismo? ¿El crecimiento económico? ¿Nuestros estándares de vida actuales? Todas las suposiciones anteriores están fuera de juego. ¿Qué camino seguir ahora? El cambio sistémico será obligatorio.

Por supuesto, hay un enorme segmento de los activistas de base en el mundo que ya lo ha entendido instintivamente desde hace algún tiempo, y no han esperado a que los gobiernos, de forma separada o en colaboración con otros, hagan lo correcto. El mundo está lleno de ejemplos en todos los continentes de esfuerzos entusiastas para transformar comunidades en sistemas económicos sostenibles y localmente viables. Vemos un virtual renacimiento de producción de alimentos mucho más local, reemplazando así los suministros del sistema industrial agrícola que distribuye mercancías a menudo desde miles de kilómetros de distancia por mar y por tierra. Y este floreciente movimiento está apoyado directamente por un movimiento paralelo hacia la reruralización. También vemos esfuerzos extraordinarios para limitar el poder de las multinacionales operando en contextos locales. Hay un creciente esfuerzo de las comunidades para hacerse con el control sobre sus bienes locales comunes; para resistir a la privatización de los servicios públicos; y para volver a valores de producción locales en los sistemas industrial y energético para que la conservación se coloque por encima del consumo. Hay miles de otros esfuerzos que también buscan afirmar la soberanía local.

Entre las expresiones más interesantes de estas tendencias se encuentra el nacimiento y extensión de un movimiento internacional de «Comunidades en transición». Lanzado originalmente hace unos años en el sudoeste de Inglaterra, ha ayudado a inspirar literalmente miles de esfuerzos similares en comunidades locales, incluyendo muchas en los EEUU. Estas iniciativas intentan volver a la mesa de diseño para convertir todos los sistemas en funcionamiento en esfuerzos para una conservación activa que minimicen el consumo de materiales y de energía, protegiendo los recursos escasos, mientras nos movemos hacia unos sistemas de producción y de consumo energético que sean conscientes y reaccionen a un conjunto alternativo de valores.

Hasta ahora, esto no está amenazando aún a las mayores maquinarias de industrialismo y crecimiento, ni a la primacía del poder empresarial, pero el tiempo está definitivamente del lado de dichas iniciativas. Es responsabilidad de todos nosotros el alinearnos con ellos. En ese caso, es obligatorio que construyamos y actuemos a nivel local de base, pidiendo a la vez el cambio a nuestras instituciones gobernantes, local, nacional e internacionalmente. Pero en cualquier caso, como el documento que van a leer ayuda a aclarar de forma exquisita, el status quo no sobrevivirá.

JERRY MANDER

Uno

VISIÓN GENERAL

Este informe pretende ser un examen no técnico de una cuestión básica: *¿Puede cualquier combinación de las fuentes energéticas conocidas cubrir con éxito las necesidades de energía necesarias al menos hasta el año 2100?* Al final, llegamos a la inquietante conclusión de que *todas* las fuentes de energía conocidas están sujetas a estrictos límites de una clase u otra. Las fuentes de energía convencionales como el petróleo, el gas, el carbón y la nuclear se encuentran en los límites, o cerca de ellos, de su capacidad de crecimiento anual y disminuirán en las próximas décadas, y en todos los casos existe un riesgo inaceptable para el medio ambiente. Y en contra de las esperanzas de muchos, no hay un escenario práctico claro con el que podamos reemplazar la energía de las fuentes convencionales de hoy, con suficiente energía procedente de fuentes *alternativas* para mantener la sociedad industrial en su actual escala de funcionamiento. Para conseguir una transición así sería necesario (1) una vasta inversión financiera más allá de las posibilidades prácticas de la sociedad, (2) muchísimo tiempo – demasiado en términos prácticos- para construirla, y (3) importantes sacrificios en términos de calidad de energía y fiabilidad.

Quizá el límite más significativo para los suministros de energía futuros sea el factor “energía neta”: el requerimiento de que los sistemas energéticos rindan más energía de la que se invierte en su construcción y su funcionamiento. Hay una gran posibilidad de que los sistemas energéticos futuros, tanto convencionales como alternativos tengan unos costes de *inputs* de energía mayores que aquellos que dieron energía a las sociedades industriales durante el último siglo. Volveremos a este punto repetidamente.

El informe explora alguno de los escenarios de transición de energía propuestos actualmente,

mostrando por qué, hasta el momento, la mayoría son demasiado optimistas, ya que no tienen en cuenta todos los factores relevantes que limitan la expansión de fuentes energéticas alternativas. Finalmente, muestra por qué la conservación de la energía (usando menos energía y también menos recursos materiales) combinada con una disminución gradual, humana, de la población deben convertirse en las estrategias principales para conseguir la sostenibilidad.

* * *

El actual régimen energético mundial es insostenible. Esta es la reciente, explícita conclusión de la Agencia Internacional de la Energía[1], y es también el núcleo de un amplio y creciente consenso público en todo el espectro político. Un segmento de este consenso se refiere al clima y demás impactos medioambientales por la dependencia de la sociedad de los combustibles fósiles. El otro se preocupa principalmente por cuestiones relativas a la seguridad de los futuros suministros de estos combustibles, los cuales, a medida que se agotan, se encuentran concentrados cada vez más en unos pocos países. Decir que el actual régimen energético es insostenible implica que no puede continuar y por lo tanto debe ser sustituido por otro. Sin embargo, reemplazar la infraestructura energética de las modernas sociedades industriales no es un asunto trivial. Se han necesitado décadas para construir la actual infraestructura de petróleo-carbón-gas y se han invertido billones de dólares. Además, si la transición de las actuales fuentes de energía a las alternativas se gestiona mal, las consecuencias pueden ser graves: hay una innegable conexión entre los niveles de consumo de energía per-cápita y el bienestar económico[2]. El no conseguir proporcionar suficiente energía, o energía de suficiente calidad, podría minar el futuro bienestar de la humanidad, mientras que no conseguir hacer rápidamente la transición para dejar los combustibles fósiles podría poner en peligro los ecosistemas vitales de la Tierra. Sin embargo, sigue siendo un lugar común que las fuentes de energía alternativas capaces de sustituir a los combustibles fósiles se pueden conseguir fácilmente –ya se trate de fósiles (arenas o esquistos bituminosos), nuclear, o una larga lista de renovables- y están listas para ponerse en marcha de forma masiva. Todo lo que es necesario, según este punto de vista, es invertir lo suficiente en ellas y la vida seguirá básicamente tal como hasta ahora. *¿Pero es así?* Toda fuente de energía tiene unas características muy específicas. De hecho, han sido las características de las actuales fuentes de energía (principalmente el petróleo, el carbón y el gas natural) las que han permitido la construcción de una sociedad moderna con gran movilidad, una gran población y altas tasas de crecimiento económico. ¿Pueden perpetuar las fuentes de energía alternativas este tipo de sociedad? ¡Ay! Creemos que no. Mientras se pueden señalar innumerables instalaciones alternativas de producción de energía en las sociedades modernas (que van desde los pequeños sistemas fotovoltaicos para un hogar hasta las grandes “granjas” de turbinas de viento de tres megavatios), no es posible mostrar más que unos pocos ejemplos de un moderno país industrial que obtenga toda su energía de otras fuentes que no sean el petróleo, el carbón y el gas natural. Uno de estos raros ejemplos es Suecia, que obtiene la mayor parte de su energía a partir de plantas nucleares e hidroeléctricas. Otro es Islandia, que se beneficia de recursos geotérmicos inusualmente grandes que no se encuentran en muchos otros países. Incluso en estos dos casos, la situación es más compleja de lo que parece. La construcción de la infraestructura de estas plantas se basa principalmente en combustibles fósiles para la minería de las menas y los materiales primarios, el procesamiento de los materiales, el transporte, la manufactura de los componentes, la minería del uranio, la construcción, y demás. Así, para la mayor parte del mundo, una transición energética significativa es más teoría que realidad. Pero si las fuentes de energía primaria actual son insostenibles, esto supone un problema enorme. La transición a fuentes alternativas *debe* ocurrir, o el mundo no tendrá suficiente energía para mantener los servicios básicos para sus 6,7 miles de millones de personas (y aumentando). Es por tanto de vital importancia que se evalúen cuidadosamente de acuerdo a criterios pertinentes, y que se formule y se dote de fondos un

plan organizado para una transición social sistémica del petróleo, el carbón y el gas natural hacia las fuentes de energía alternativas que se consideren más capaces de proporcionar el tipo de beneficios económicos a los que estamos acostumbrados procedentes de los combustibles fósiles convencionales. Ya es posible llenar una estantería con los informes de organizaciones ambientalistas no gubernamentales y los libros de analistas de energía, fechados entre los primeros años setenta y la actualidad, todos ellos intentando dar a luz vías de transición energética alternativas para los EEUU y para el mundo en su conjunto. Estos planes y propuestas varían en amplitud y calidad, y especialmente, en su éxito para identificar claramente los factores que limitan que las fuentes de energía alternativas sean capaces de reemplazar adecuadamente los combustibles fósiles convencionales.

El propósito central de este documento es revisar sistemáticamente los factores clave limitantes que se dejan a menudo fuera de tales análisis. Empezaremos ese proceso en la siguiente sección. Tras ello, iremos más allá en la profundización de un criterio clave: *la energía neta o retorno de energía sobre la energía invertida* [*energy returned on energy invested* (EROEI). A menudo se traduce también como Tasa de Retorno Energético (TRE)]. Esta medida pone el foco en la cuestión clave: una vez tenido todo en cuenta, ¿cuánta energía de más produce un sistema de la que es necesaria para desarrollar y hacer funcionar ese sistema? ¿Cuál es la relación entre *entrada (input)* y *salida (output)* de energía? Algunas “fuentes” de energía se puede demostrar que producen muy poca o ninguna energía *neta*. Otras son solo mínimamente positivas.

Por desgracia, como veremos con más detalle más adelante, la investigación sobre la EROEI continúa sufriendo de una falta de estándares de medida prácticos, y su uso e implicaciones siguen siendo ampliamente incomprensidos. Sin embargo, para el propósito de una planificación a gran escala y a largo plazo, la energía neta puede ser el criterio más vital para evaluar las fuentes de energía, ya que revela claramente los sacrificios implicados en cualquier cambio a nuevas fuentes de energía.

Este informe no pretende servir como análisis final, autorizado y completo de las opciones energéticas disponibles, ni como un plan para una transición de ámbito nacional o global desde los combustibles fósiles a los alternativos. Aunque tales análisis y planes son necesarios, requieren recursos institucionales y reevaluaciones continuas para que tengan valor. Aquí el objetivo es simplemente identificar y explicar los criterios más importantes que deberían utilizarse en tales análisis y planes, con especial énfasis en la *energía neta*, y ofrecer una evaluación superficial de las fuentes energéticas actualmente disponibles usando esos criterios. Esto nos dará una visión general preliminar de si las fuentes alternativas son capaces de reemplazar a los combustibles fósiles; y si no lo son, podemos empezar a explorar cuál podría ser la estrategia a la que podrían echar mano los gobiernos y las otras instituciones responsables de la sociedad moderna. Como veremos, la inquietante conclusión fundamental del informe es que hay muy pocas posibilidades de que se pueda contar con que los combustibles convencionales fósiles o que las fuentes de energía alternativas proporcionen la cantidad y calidad de energía que será necesaria para mantener el crecimiento económico –o incluso los actuales niveles de actividad económica- durante lo que queda de siglo.

Esta conclusión preliminar sugiere a su vez que un plan de transición energética sensato tendrá que enfatizar la conservación de energía por encima de todo. También plantea cuestiones acerca de la sostenibilidad del crecimiento *per se*, tanto en términos de población humana como de actividad económica.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

CCS [CAC]: Captura y almacenamiento de carbono [Carbon Capture and Storage]. Cuando se aplica al carbón, este de alguna manera todavía hipotético conjunto de tecnologías es llamado “carbón limpio”. Muchos expertos en energía dudan de que la CAC se pueda desarrollar a una escala significativa.

Dióxido de carbono o CO₂: Un gas incoloro, inodoro e incombustible que se forma durante la respiración, combustión y descomposición orgánica. El dióxido de carbono es un constituyente menor de la atmósfera de la Tierra, pero su abundancia se ha incrementado sustancialmente (de 280 partes por millón a 387 ppm) desde el inicio de la Revolución Industrial debido a la quema de combustibles fósiles. El CO₂ atrapa el calor en la atmósfera de la tierra. A medida que la concentración de gases aumenta se eleva la temperatura del planeta.

DDGS: Granos de destilería secos con solubles [Distillers Dried Grains with Solubles]. Un subproducto de la producción de etanol a partir del maíz, el DDGS se utiliza normalmente como pienso para el ganado.

Eficiencia: La relación entre la salida [*output*] útil de una máquina de conversión de la energía y la entrada [*input*] en términos de energía. Cuando la salida útil de la conversión aumenta en relación a la entrada, la máquina se considera más eficiente energéticamente. Normalmente se aplica la eficiencia a máquinas que usan energía para hacer trabajo (como coches o aparatos eléctricos del hogar), o que convierten la energía de una forma a otra (como las plantas que queman carbón para producir electricidad). La eficiencia difiere de la EROEI (ver abajo), que normalmente describe la relación entre los *inputs* más amplios de energía y los *outputs* de un sistema de producción de energía, como una mina de carbón, una granja eólica o un campo petrolífero en funcionamiento. Esta distinción puede ser confusa, porque a veces tanto la eficiencia como la EROEI se pueden aplicar a aspectos diferentes del mismo sistema energético. Por ejemplo, se usa la eficiencia para describir el input/output de una panel solar fotovoltaico (en el sentido de cuánta de la energía de la luz solar se convierte en electricidad), mientras la EROEI describe cuánta energía útil producirá el panel comparada con la cantidad de energía necesaria para construirlo y mantenerlo.

EGS [SGA]: Sistema geotérmico aumentado [Enhanced Geothermal System]. Hace referencia a una tecnología incipiente que emplea equipamiento desarrollado por la industria del petróleo y el gas para canalizar agua mediante tuberías profundamente en el interior de la superficie de la Tierra, donde el calor natural de la corteza terrestre la vuelve vapor que puede mover una turbina.

EIA: Oficina para la Información de la Energía [Energy Information Administration], una rama del Departamento de Energía de los EEUU.

Electricidad: Energía utilizable gracias al flujo de una carga eléctrica a través de un conductor.

Energía incorporada [Embodied energy]: la energía disponible que fue utilizada en el trabajo de crear un producto. Esto incluye las actividades necesarias para adquirir los recursos naturales, la energía utilizada para fabricarlo y en la creación del equipamiento y en otras funciones de apoyo –esto es, la energía directa más la energía indirecta-.

Energía: La capacidad de un sistema físico de realizar un trabajo, medida en julios o ergios. (Vea una definición ampliada en la siguiente página).

Portador de energía [Energy carrier]: Una sustancia (como el hidrógeno) o un fenómeno (como la corriente eléctrica) que se puede utilizar para producir un trabajo mecánico o calor o para realizar procesos químicos o físicos. En términos prácticos, se refiere a los medios para transmitir la energía de la fuente final a una aplicación práctica. Nuestro sistema nacional de plantas de generación eléctrica y de líneas eléctricas sirve a esta función: convierte la energía del carbón, gas natural, uranio, corriente de agua, viento o sol a un portador común (electricidad) del que se puede disponer ampliamente para cumplir un gran abanico de tareas.

EROEI: Energía retornada según la energía invertida [“Energy Returned on Energy Invested,”] también conocida como EROI (retorno de energía según inversión) [energy return on investment], es la relación entre la cantidad de energía utilizable adquirida de un recurso de energía particular y la

cantidad de energía gastada en obtener ese recurso energético. No debe confundirse con la eficiencia (ver arriba).

Tarifa compensatoria de energía [Feed-in tariff]: Un incentivo para promover la adopción de energías renovables mediante legislación gubernamental. Las compañías eléctricas regionales o nacionales se ven obligadas a comprar electricidad renovable (de fuentes renovables como la energía solar fotovoltaica, eólica, biomasa, hidroeléctrica y geotérmica) a unas tasas constantes por encima del mercado establecidas por el gobierno.

Energía alimenticia: La cantidad de energía almacenada químicamente presente en los alimentos, medida normalmente en kilocalorías (a menudo escritas simplemente como ‘calorías’). Todos los animales requieren una toma periódica mínima de energía alimentaria –así como agua y un conjunto de nutrientes específicos (vitaminas y minerales)-.

GHG: Gases de efecto invernadero [Greenhouse gases].

Caballo de vapor: Una unidad de potencia con la que se pretendía originalmente medir y comparar el *output* de los motores de vapor con el *output* de los caballos de tiro. La definición de un caballo de vapor varía en diferentes aplicaciones (por ejemplo, al medir calderas o motores eléctricos); sin embargo, la definición más común, aplicada principalmente a los motores eléctricos, es una unidad de potencia equivalente a 746 vatios. Cuando las unidades de caballos de vapor se usan en el marketing de productos de consumo, los métodos de medida son diseñados a menudo por los anunciantes para maximizar la magnitud del número, incluso si ello no refleja la capacidad real del producto para realizar un trabajo bajo condiciones normales.

AIE [IEA]: Agencia Internacional de la Energía [International Energy Agency]. Con sede en París, la AIE fue creada por la OCDE tras la crisis del petróleo de 1973 para monitorizar los suministros mundiales de energía.

IGCC: Ciclo integrado de gasificación combinada [Integrated Gasification Combined Cycle], un tipo avanzado de planta de carbón en la que este es objeto junto con agua y aire de una alta presión y calor para producir un gas –gas de síntesis [syngas], compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono- y un residuo sólido. A continuación elimina las impurezas del gas sintético antes de quemarlo.

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Intergovernmental Panel on Climate Change], un organismo científico cuya tarea es evaluar el riesgo del cambio climático causado por la actividad humana. El panel fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. El IPCC compartió en 2007 el Premio Nobel de la Paz con Al Gore.

Julio: Una unidad de energía eléctrica equivalente al trabajo hecho cuando una corriente de un amperio pasa a través de una resistencia de un ohm durante un segundo.

Mb/d: Millones de barriles por día.

Fotovoltaico (FV) [Photovoltaic (PV)]: Produce un voltaje al ser expuesto a energía radiante (especialmente la luz del sol).

Energía neta (a veces denominada Ganancia de energía neta): Un concepto utilizado en la economía de la energía para referirse a la relación entre la energía gastada para aprovechar una fuente de energía y la cantidad de energía ganada en ese aprovechamiento.

Potencia: La tasa de trabajo realizado medida en vatios (julios por segundo). (Vea caballo de vapor arriba).

Transesterificación: Un proceso que convierte la grasa animal o más comúnmente el aceite vegetal en biodiesel. En términos más técnicos: la reacción de un triglicérido (grasa/aceite) con un alcohol para formar ésteres (una clase de compuestos orgánicos formados de un ácido orgánico y un alcohol) y glicerol (glicerina). La reacción a menudo se cataliza mediante la adición de un alcalino fuerte como el hidróxido de sodio (lejía).

Muro trombe [Trombe wall]: Un elemento típico de un diseño solar pasivo, una pared trombe es un muro muy grueso, encarado al sur, que es pintado de negro y está hecho de un material que absorbe

mucho calor. Una hoja de vidrio o plástico, instalada a unos pocos centímetros delante del muro, ayuda a mantener el calor. El muro se calienta lentamente durante el día. Luego se enfría gradualmente durante la noche, dando calor al interior del edificio.

UCG: Gasificación de carbón subterránea [Underground coal gasification]. Donde fuese factible, esta tecnología podría gasificar el carbón de forma más barata que las plantas IGCC (la gasificación del carbón es una etapa en el CCS, ver arriba).

Vatio: Una unidad de potencia equivalente a un julio por segundo.

Vatio-hora: Una unidad de energía equivalente a la potencia de un vatio operando durante una hora.

Kilovatio (KW): Mil vatios.

KWH: Mil vatios-hora.

Megavatio (MW): Un millón de vatios.

MWH: Un millón de vatios-hora.

Gigavatio (GW): Mil millones de vatios.

GWH: Mil millones de vatios-hora.

Teravatio (TW): Un billón de vatios.

TWH: Un billón de vatios-hora.

Trabajo: La transferencia de energía de un sistema físico a otro, especialmente la transferencia de energía a un cuerpo por la aplicación de una fuerza que mueve el cuerpo en la dirección de la fuerza. Se calcula como el producto de la fuerza y la distancia a través de la que se mueve el cuerpo y se expresa en julios, ergios y pies-libra.

¿QUÉ ES ‘ENERGÍA’?

A menudo se define la energía como “la capacidad de un sistema físico de realizar un trabajo”, mientras se dice que trabajo es “fuerza por distancia recorrida”. Pero estas definiciones rápidamente se vuelven circulares, puesto que nadie ha visto “fuerza” o “energía” separadas del efecto que estas tienen sobre la materia (que es en sí misma difícil de definir en el análisis final). Sin embargo, por difícil que resulte definirla, sabemos que la energía es la base de todo: sin ella, nada sucede. Las plantas no crecen, los coches no se mueven y nuestras casas se vuelven incómodamente frías en invierno. Los físicos pueden discutir la energía en relación a las estrellas y los átomos, pero la energía es igualmente importante para los ecosistemas y las economías humanas: sin fuentes de energía, los seres vivos mueren y las economías se detienen.

A lo largo de la historia, la mayor parte de la energía que los humanos han utilizado les llegaba en forma de comida –la energía de la luz solar capturada y almacenada en plantas (y en animales que comen plantas). Al mismo tiempo, los humanos han ejercido energía, principalmente mediante sus músculos, para obtener lo que querían y necesitaban, incluyendo los alimentos. Era esencial que capturasen más energía de la que gastaban en conseguirla; de otra forma, llegaba el hambre.

Con la domesticación de los animales, la energía principal siguió viniendo de los alimentos, pero muchos de esos alimentos (a menudo de una clase que la gente no podía comer) se utilizaban para alimentar a los animales, cuyos músculos se podían enjaezar a arados, carretas y carros. Durante mucho tiempo la gente también utilizó energía no alimenticia quemando madera (un almacenamiento de energía solar) para calentarse.

Más recientemente, los humanos han encontrado formas de “digerir” energía que hace millones de años fue almacenada en forma de combustibles fósiles –no “digiriéndola” en sus estómagos, sino en los motores de máquinas que hacen el trabajo que solían hacer los músculos humanos o animales-; de hecho, hemos inventado máquinas para hacer muchísimas más cosas de las que podíamos hacer

previamente, lo que incluye trabajo que los músculos humanos nunca hubieran podido realizar. Dado que los combustibles fósiles representan energía almacenada en una forma más concentrada que la que se encuentran en los alimentos que comemos; dado que podemos usar combustibles para dar potencia a una gran variedad de máquinas, y dado que ha sido posible capturar combustibles fósiles en enormes y crecientes cantidades, la humanidad ha podido construir una economía global interconectada de un alcance sin precedentes. Sin embargo, los combustibles fósiles son por su misma naturaleza recursos que se agotan, finitos. Así, durante las últimas décadas se ha dado un enorme y creciente interés al desarrollo de fuentes de energía no fósiles, “alternativas”. Hoy, cuando discutimos los problemas energéticos nacionales o globales nos preocupamos principalmente por la energía para nuestras máquinas. La mayor parte de la energía que usan los humanos es todavía, en esencia, energía solar –la luz solar capturada en las cosechas o los bosques; antigua luz solar almacenada en combustibles fósiles; luz solar que calienta el aire y mueve el viento cuya potencia se puede capturar con turbinas; o luz solar transformada directamente en electricidad mediante paneles fotovoltaicos-. Además, también disponemos de algunas formas de energía no solares: el poder de las mareas captura la influencia gravitacional de la Luna y otros cuerpos celestes; la energía geotérmica utiliza el calor de la Tierra, y la energía nuclear aprovecha la energía procedente de la descomposición de elementos radioactivos. Aunque usamos más fuentes de energía que nuestros antepasados, y las usamos de forma más ingeniosas e impresionantes, se sigue aplicando el mismo principio vital que en el pasado, cuando nuestras preocupaciones energéticas estaban más directamente relacionadas con la luz solar, las plantas verdes y los músculos: todavía debemos gastar energía para obtener energía, y nuestro éxito continuado como especie depende en gran manera de nuestra capacidad para obtener más energía de los esfuerzos para capturar energía que la que gastamos en esos esfuerzos.

Dos

NUEVE CRITERIOS CLAVE: COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS Y SUS LÍMITES

Al evaluar las fuentes de energía es esencial prestar atención en primer lugar a los criterios que están siendo utilizados. Algunos criterios nos dan buena información sobre la utilidad de una fuente de energía para aplicaciones específicas. Por ejemplo, una fuente de energía como los esquistos bituminosos que es un material sólido a temperatura ambiente y tiene una baja densidad energética por unidad de peso y volumen es altamente improbable que sea buena como combustible para el transporte a no ser que primero de alguna forma provechosa se convierta en un combustible líquido con mayor densidad de energía (es decir, uno que contenga más energía por unidad de peso o volumen). Otro criterio mide el potencial de una fuente de energía específica para dar energía a grandes sectores de una sociedad. La energía micro-hidroeléctrica, por ejemplo, puede ser medioambientalmente benigna, pero su rendimiento no se puede incrementar a una escala suficiente como para proporcionar una parte significativa del presupuesto nacional de energía de los EEUU u otros países industrializados. En general, es importante identificar las fuentes de energía que tienen la capacidad de ser escaladas para producir grandes cantidades de energía, que tienen una utilidad económica alta y que tienen un mínimo impacto medioambiental, especialmente aquel impacto relacionado con el uso de la tierra y requerimientos de agua, así como con las emisiones de gases de efecto invernadero. Solo las fuentes que pasen estas pruebas tienen la capacidad de convertirse en nuestras futuras fuentes de energía *primarias*: esto es, aquellas capaces de proporcionar energía a la escala que los combustibles fósiles

tienen hoy.

La utilidad económica y la escalabilidad de cualquier fuente de energía están determinadas por tres factores principales: el tamaño de la base del recurso, la densidad energética del recurso en sí, y la cantidad y naturaleza de otros recursos y las infraestructuras necesarias para procesar y utilizar la fuente de energía en cuestión.

El economista Douglas Reynolds, en un estudio en el que discute la densidad de energía de las fuentes de energía (que él denomina “grado de energía”), escribe:

«La energía es la fuerza rectora de la producción industrial y es en realidad la fuerza rectora de cualquier actividad económica. Sin embargo, si un recurso energético económicamente disponible tiene pocos grados, es decir, poca productividad potencial, la nueva tecnología no podrá estimular demasiado el crecimiento económico. Por otra parte, un recurso energético de alto grado podría magnificar el efecto de la tecnología y crear un tremendo crecimiento económico. Los recursos de alto grado [es decir, aquellos que tienen una densidad energética alta] pueden actuar como magnificadores de la tecnología, pero los recursos de bajo grado pueden aguar la fortaleza de la nueva tecnología. Esto lleva a la conclusión de que es importante enfatizar más el papel de la naturaleza intrínseca de los recursos en el crecimiento económico”.[\[3\]](#)

TABLA 1A: COSTE ACTUAL DE LA ENERGÍA

Coste de la generación actual de energía

(centavos por kWh)

Carbón 2 a 4

Gas natural 4 a 7

Hidroeléctrica 1

Nuclear 2.9

Eólica 4.5 a 10

Biomasa 4 a 9

Solar FV 21 a 83

Geotérmica 10

Solar térmica 6 a 15

Mareas 10

Olas 12

Tabla 1A. Estos son los costes aproximados de producción de once fuentes de energía. (Los consumidores privados normalmente pagan entre \$.10 y \$.20 por kWh.) Fuente: U.S. Federal Regulatory Commission, 2007.

Tabla 1A (4) Pero la utilidad económica no es la única prueba que debe pasar una fuente de energía. Si hay algo que debemos aprender de la crisis climática actualmente en curso y empeorando, es que los impactos medioambientales de las fuentes de energía deben ser tomados realmente en serio. El mundo no se puede permitir reemplazar el petróleo, el carbón y el gas con otras fuentes de energía que puedan suponer un reto a la supervivencia de las futuras generaciones.

Así que aquí presentamos nueve criterios de evaluación energética. En la sección que sigue a esta describiremos un décimo, la energía neta.

1. Coste monetario directo

Este es el criterio al que normalmente se le presta más atención. Claramente, la energía debe ser asequible y con precios competitivos para ser útil a la sociedad. Sin embargo, el coste monetario inmediato de la energía no siempre refleja su coste *real*, ya que algunas fuentes de energía se pueden beneficiar de enormes subsidios estatales ocultos, o pueden tener costes externalizados (como graves impactos medioambientales que más tarde necesitarán ser corregidos). El coste monetario de los recursos energéticos está principalmente determinado por los otros criterios que se citan más abajo.

El coste de la energía normalmente incluye factores tales como el coste de la extracción y refinado del recurso u otra modificación o mejora del recurso, y el transporte. La amortización de la inversión en infraestructura (fábricas para la construcción de paneles solares; plantas nucleares; refinerías y líneas de alta tensión, tuberías y tanques) debe reflejarse inevitablemente en los precios de la energía.

Sin embargo, los precios también pueden ser distorsionados por subsidios o restricciones de diverso tipo: recortes de impuestos a determinado tipo de compañías energéticas, regulaciones sobre contaminación, inversión gubernamental en investigación y desarrollo sobre la energía, e inversión gubernamental en infraestructuras que favorezcan el uso de un tipo particular de energía.

2. Dependencia de otros recursos

TABLA 1B: COSTE DE NUEVA ENERGÍA	
Coste de nueva energía (\$/kW)	
Carbón 1900-5800	
Gas natural 500-1500	
Hidroeléctrica ND	
Nuclear 4500-7500	
Eólica 1300-2500	
Biomasa ND	
Solar FV 3900-9000	
Geotérmica 2600-3500	
Solar térmica 3000-5000	
Mareas ND	
Olas ND	

Tabla 1B. "Nueva generación" se refiere al coste de infraestructura para introducir la capacidad de producir un kilovatio sobre la base actual; no se refiere al coste de la energía ya generada actualmente por kilovatio hora. Fuente: U.S. Federal Regulatory Commission, 2007.:

Tabla 1B (5) Muy pocas fuentes de energía se encuentran en una forma utilizable inmediatamente. Un ejemplo: sin realizar ningún esfuerzo ni emplear ninguna tecnología podemos ser calentados por la luz del sol que cae sobre nuestros hombros en un día de primavera. En contraste, la mayor parte de las fuentes de energía, para poder ser utilizadas, requieren algún tipo de captura, minado o procesado para después convertirse en la energía resultante. A su vez, esto normalmente implica algún tipo de aparato, hecho de algún tipo de material adicional (por ejemplo, el equipamiento de perforación petrolera está hecho de acero y diamantes). Y a veces, el proceso de extracción o conversión utiliza recursos adicionales (por ejemplo, la producción de diesel sintético a partir de las arenas asfálticas requiere enormes cantidades de agua y gas natural, y la producción de biocombustibles requiere grandes cantidades de agua). La cantidad o la escasez de los materiales o recursos añadidos, y la complejidad y coste de los diversos aparatos requeridos en

diferentes etapas constituyen factores limitadores importantes en la mayor parte de los modos de producción energética. Los requerimientos de recursos auxiliares en las primeras etapas de producción para producir una determinada cantidad de energía se reflejan finalmente en el precio pagado por esa energía. Pero esto no es siempre así, o no completamente. Por ejemplo, muchos paneles de película delgada fotovoltaica incorporan materiales como el galio y el indio que no son renovables y son raros, y que se están agotando rápidamente. Aunque el precio de los paneles de películas delgadas FV refleja e incluye el precio del mercado actual de estos materiales, esto no nos da muchas pistas de los límites futuros al producir en masa estas películas delgadas FV debido a la escasez de materiales.

3. Impactos medioambientales

Virtualmente todas las fuentes de energía producen impactos medioambientales, pero unas producen más impacto que otras. Esto puede ocurrir durante la adquisición del recurso (en las minas de carbón o al perforar buscando petróleo, por ejemplo), o durante la liberación de la energía carbónica del recurso (por ejemplo, al quemar madera, carbón, petróleo o gas natural). Otros impactos se producen en la conversión de la energía de una forma a otra (por ejemplo, al convertir la energía cinética del agua que fluye en electricidad mediante pantanos e hidroturbinas); o en la posibilidad de sucesos catastróficos, como en la producción de energía nuclear; o en los problemas de eliminación de residuos. Otros pueden ser intrínsecos al proceso de producción, como los daños de diversas formas a los bosques o al manto vegetal en la producción de biocombustibles.

Algunos impactos medioambientales son indirectos y sutiles. Se pueden producir durante la manufactura del equipamiento utilizado en la captura o conversión de la energía. Por ejemplo, la extracción y manipulación de recursos utilizados en la manufactura de paneles solares puede producir mucho más daño que la operación de los paneles en sí.

4. Capacidad de renovación

Si deseamos que nuestra sociedad continúe usando energía a ritmos de flujo industriales no solo durante años o incluso décadas sino durante siglos, necesitaremos fuentes de energía que se puedan mantener más o menos indefinidamente. Los recursos energéticos como el petróleo, el gas natural y el carbón son claramente no renovables porque el tiempo necesario para formarse mediante procesos naturales se mide en decenas de millones de años, mientras las cantidades disponibles solo podrán proporcionar energía a la sociedad, en el mejor de los casos, durante unas pocas décadas a los ritmos actuales de uso. En contraste, las fuentes de energía solar fotovoltaica y solar termal se basan en la luz del sol, la que a efectos prácticos podemos considerar inagotable y seguirá disponible en cantidades similares durante miles de años. Es importante repetir una vez más, sin embargo, que el *equipamiento* utilizado para capturar la energía solar o eólica no es renovable en sí mismo y que quizá sea necesario utilizar recursos escasos, que se están agotando y no son renovables y cantidades significativas de energía para manufacturar buena parte del equipamiento crucial.

Algunas fuentes de energía *son* renovables pero también se pueden agotar. Por ejemplo, la madera se puede talar en bosques que se regeneran por sí mismos; sin embargo, la *tasa* de tala es crucial: si se sobreexplota, los árboles no podrán volver a crecer con la suficiente velocidad y el bosque puede disminuir y desaparecer. Incluso las fuentes de energía que son renovables y no sufren agotamiento están sin embargo limitadas por el tamaño de la base del recurso (como se discutirá a continuación).

5. Tamaño potencial o escala de contribución

Estimar la contribución potencial de una fuente de energía es obviamente esencial para una planificación a gran escala, pero tales estimaciones están siempre sujetas a error –que a veces puede ser enorme-. Respecto a los combustibles fósiles, las cantidades que se puede esperar razonablemente que

sean extraídas y utilizadas sobre la base de las tecnologías de extracción actuales y de los precios de los combustibles se clasifican como *reservas*, que son siempre una mera fracción de los *recursos* (definidos como la cantidad total de la sustancia presente en el terreno). Por ejemplo, la primera estimación de reservas de carbón hecha por el Servicio Geológico de los EEUU, completada en 1907, identificaba suministros para un periodo de 5.000 años. En las décadas posteriores, la mayor parte de las “reservas” se han reclasificado como “recursos”. Las reservas se han rebajado a recursos cuando se han tenido en cuenta factores limitadores, como (en el caso del carbón) el espesor y profundidad de la veta, las impurezas químicas y la localización del depósito.

Hoy, las estimaciones oficiales consideran que quedan 250 años de carbón utilizable –una cifra que sigue siendo probablemente demasiado optimista (tal como concluyó la Academia Nacional de Ciencias en su informe de 2007, *Carbón: investigación y desarrollo a favor de una política nacional energética*).

Por otro lado, las reservas pueden a veces crecer como resultado del desarrollo de nuevas tecnologías de extracción, como ha ocurrido en los últimos años con los suministros de gas natural estadounidenses: mientras la producción de gas natural convencional está disminuyendo, nuevas tecnologías de fractura subterránea han permitido la recuperación de gas “no convencional” de rocas de baja porosidad, incrementando significativamente la proporción de gas natural nacional y expandiendo las reservas de gas de EEUU.

La estimación de las reservas es especialmente difícil cuando se trata de recursos energéticos que tienen ningún o muy escaso historial de extracción. Es el caso, por ejemplo, de los hidratos de metano, respecto al cual varios expertos han publicado un amplio rango de estimaciones tanto del total de recursos como de futuros suministros extraíbles. Lo mismo se puede decir de los esquistos bituminosos, y en menor grado de las arenas asfálticas, que tienen unas historias de extracción limitadas.

Estimar el potencial de suministro de los recursos renovables, tales como la energía solar y eólica es también problemático, porque inicialmente se pasan por alto muchos factores limitantes. Con respecto a la energía solar, por ejemplo, un examen superficial del recurso final es altamente esperanzador: la cantidad total de energía absorbida anualmente por la atmósfera de la Tierra, los océanos y las masas terrestres procedente de la luz del sol es aproximadamente 3.850.000 exajulios (EJ) –cuando la población mundial usa actualmente solo cerca de 498 EJ de energía por año de todas las fuentes combinadas[6], una parte insignificante de la cifra anterior. Sin embargo, los factores que limitan la cantidad de luz del sol que puede potencialmente utilizarse para la humanidad son numerosos, como veremos con más detalle debajo.

Consideremos el caso del metano recuperado de vertederos municipales. En este caso, el uso del recurso proporciona un beneficio medioambiental: el metano es un gas de efecto invernadero más poderoso que el dióxido de carbono, así que capturar y quemar gas de vertedero (en lugar de dejar que se difumine en la atmósfera) reduce el impacto sobre el clima y a la vez proporciona un fuente local de energía. Si el gas de vertedero pudiese proporcionar energía a la red eléctrica estadounidense, el país podría dejar de extraer y quemar carbón. Sin embargo, el tamaño potencial del gas de vertedero es lastimosamente insuficiente para mantenerla. Actualmente el país obtiene alrededor de 11 mil millones de KWh por año procedente de gas de vertedero para usos comerciales, industriales y de generación de electricidad. Esta cifra podría probablemente ser doblada si se aprovecharan más vertederos[7]. Pero los consumidores de electricidad de los EEUU utilizan cerca de 200 veces más energía. Hay otro problema: si la sociedad va a ser más sensata medioambientalmente, el resultado será que la cantidad de basura que irá a los vertederos será menor –y esto reduciría la cantidad de energía que se podría

obtener de los futuros vertederos-.

6. Localización del recurso

La industria del combustible fósil hace ya tiempo que afrontó el problema del “gas varado” –embalses de gas natural que están lejos de los oleoductos y son demasiado pequeños para justificar la construcción de un oleoducto para acceder a ellos-. Muchos recursos renovables a menudo se encuentran con inconvenientes y costos similares causados por la distancia.

Las localizaciones de las instalaciones solares y eólicas vienen dictadas en gran manera por la disponibilidad de la fuente de energía primaria; pero a menudo, el sol y el viento son más abundantes en áreas escasamente pobladas. Por ejemplo, en los EEUU hay un tremendo potencial para el desarrollo de recursos eólicos en Montana y Dakota del Norte y del Sur; sin embargo, estos son tres de los estados con menos población del país. En consecuencia, para aprovechar plenamente estos recursos sería necesario enviar la energía a regiones más pobladas; esto requeriría la construcción de líneas eléctricas de alta capacidad a largas distancias, a menudo con un gran gasto y causando a veces graves impactos medioambientales. Hay también excelentes recursos eólicos en alta mar a lo largo de las costas del Atlántico y el Pacífico, más cercanas a grandes centros urbanos. Pero aprovechar estos recursos implicaría la construcción y puesta en operación de turbinas en aguas profundas, y conectarlas a la red en tierra, lo que no es algo fácil. De forma similar, los mejores recursos solares del país se encuentran en el sudoeste, lejos de los centros de población en el noreste. Por eso, aprovechar estos recursos energéticos requerirían algo más que la simple construcción de turbinas de viento y paneles solares: gran parte de la red eléctrica de los EEUU necesita ser reconfigurada y será necesario construir líneas a larga distancia de gran capacidad. Otros países se encontrarán con retos parecidos.

7. Fiabilidad

Algunas fuentes de energía son continuas: el carbón puede alimentar una caldera, al ritmo deseado, mientras haya carbón disponible. Pero algunas fuentes de energía, como la eólica o la solar, están sujetas a fluctuaciones rápidas e impredecibles. El viento a veces sopla con gran intensidad por la noche, cuando la demanda de electricidad es más baja. El sol brilla durante menos horas por día en invierno, pero los consumidores no desean reducir el uso de la electricidad durante los meses de invierno y a los operadores de sistemas energéticos se les exige que aseguren el suministro durante todo el día, todo el año.

La intermitencia del suministro de energía se puede gestionar hasta cierto punto mediante sistemas de almacenamiento –de hecho, baterías-. Sin embargo, esto implica más costes de infraestructura así como pérdidas de energía. También exige más tecnología de control. En el peor caso, significa construir mucha más capacidad de generación de electricidad de la que sería necesaria en otras circunstancias.[\[8\]](#)

8. Densidad energética

A. Densidad por peso (o gravimétrica)

Se refiere a la cantidad de energía que se puede obtener de una unidad de peso estándar de un recurso energético.

Por ejemplo, si usamos el megajulio (MJ) como medida de energía y el kilogramo (kg) como medida de peso, el carbón tiene entre 20 y 35 MJ por kg, mientras el gas natural tiene unos 55 MJ/kg y el petróleo alrededor de 42 MJ/kg. (A efectos de comparación, la cantidad de comida que una persona estadounidense que vigila su peso come a lo largo de día pesa un poco más de un kilogramo y tiene un

valor energético de alrededor de 10 MJ, o 2400 kilocalorías).

Sin embargo, como se discutirá con más detalle abajo, una batería eléctrica normalmente es capaz de almacenar y proporcionar solamente entre 0,1 y 0,5 MJ/kg, y es por esto por lo que las baterías eléctricas son problemáticas en las aplicaciones para el transporte: son muy pesadas en relación a su rendimiento energético. Por eso los coches eléctricos tienden a tener limitados rangos de distancia y los aviones eléctricos (que son muy raros) solo son capaces de llevar a una o dos personas. Los consumidores y los productores están dispuestos a pagar un plus por recursos energéticos con mayor densidad energética por peso; por eso tiene a veces sentido en algunas circunstancias, desde el punto de vista económico, convertir un combustible de baja densidad como el carbón en un combustible de alta densidad como el diesel sintético, aunque el proceso de conversión implique costes tanto monetarios como energéticos.

B. Densidad por volumen (o volumétrica)

Se refiere a la cantidad de energía que se puede obtener de una unidad de volumen dada de un recurso energético (por ejemplo, MJ por litro). Obviamente, los combustibles gaseosos tenderán a tener una menor densidad energética volumétrica que los combustibles sólidos o líquidos. El gas natural tiene alrededor de 0,35 MJ por litro a presión atmosférica del nivel del mar, y 6,2 MJ/l cuando se presuriza a 200 atmosferas. El petróleo, sin embargo, puede proporcionar alrededor de 37 MJ/l.

En muchos casos, la densidad por peso es más importante que la densidad por volumen. Sin embargo, para determinadas aplicaciones esta última puede ser decisiva. Por ejemplo, alimentar las aeronaves con hidrógeno, que tiene una alta densidad energética por peso, sería problemático porque es un gas altamente difuso a temperaturas normales y a presión atmosférica de superficie; en realidad, una aeronave con hidrógeno necesitaría tanques muy grandes aunque el hidrógeno estuviese súper-enfriado y altamente presurizado.

La mayor facilidad para transportar un combustible de alta densidad por volumen se refleja en el hecho de que el petróleo movido en buques cisterna se comercializa globalmente en grandes cantidades, mientras el buque cisterna de gas natural es relativamente pequeño. Los consumidores y los productores prefieren pagar un plus por recursos energéticos de alta densidad volumétrica.

C. Densidad por área

Esto expresa cuánta energía se puede obtener de un área de tierra dada (por ejemplo, un acre) cuando el recurso energético está en su estado original. Por ejemplo, la densidad energética por área de la madera mientras crece en un bosque es aproximadamente de 1 a 5 millones de MJ por acre. El grado por área del petróleo es usualmente de decenas o miles de millones de MJ por acre, aunque los campos petrolíferos son mucho más raros que los bosques (excepto quizá en Arabia Saudí).

La densidad por área importa porque las fuentes de energía que están altamente concentradas en su forma original requieren menos inversión y esfuerzo para ser utilizadas. Douglas Reynolds señala:

“Si el contenido energético del recurso está extendido, entonces cuesta más obtener la energía, porque una empresa tiene que usar capital de extracción de alta movilidad [maquinaria], que debe ser más pequeño y por tanto no puede disfrutar del incremento de retornos de escala. Si la energía está concentrada, cuesta menos obtenerla porque una empresa puede utilizar un capital inmóvil a mayor escala que puede capturar incrementos de retornos a escala.”^[9]

Por tanto los productores de energía preferirán pagar un plus extra por recursos energéticos que tengan alta densidad por área, como el petróleo que será refinado a gasolina, sobre otros que están más ampliamente dispersos, como el maíz que está previsto que se convierta en etanol.

9. Transportabilidad

La tranportabilidad de la energía está en gran manera determinada por la densidad de peso y volumen del recurso energético, tal como se presentó más arriba. Pero le afecta también el estado del material de la fuente (asumiendo que sea una substancia): si es sólido, líquido o gas.

En general, un combustible sólido es menos conveniente para transporte que un combustible gaseoso, porque este último se puede mover por un oleoducto (los oleoductos pueden transportar ocho veces más de volumen doblando el tamaño de las tuberías). Los líquidos son los más convenientes de todos porque pueden desplazarse igual por mangas que por tuberías, y ocupan menos espacio que los gases.

Algunas fuentes de energía no se pueden clasificar como sólidos, líquidos o gases: son flujos de energía. La energía de la luz del sol o el viento no puede ser transportada directamente; primero debe convertirse en una forma que pueda hacerlo -como el hidrógeno o la electricidad-.

La electricidad es altamente transportable, porque se mueve por cables, posibilitando que se distribuya no solamente a cualquier edificio en los países industrializados, sino a muchas localizaciones dentro de cada edificio. Transportar energía siempre supone costes –sea el coste de transportar carbón (que puede suponer más del 70 por ciento del precio del combustible), el coste de construcción y mantenimiento de oleoductos y de bombeo de petróleo o gas, o el coste de construcción y mantenimiento de la red eléctrica-. El uso de la red también implica costes ya que se pierde energía en la transmisión. Estos costes se pueden expresar en términos monetarios o en términos energéticos, y deben ser incluidos también en los cálculos para determinar las pérdidas o ganancias de energía neta, tal como discutiremos con detalle en la siguiente sección. Se podría defender que la energía neta debería presentarse simplemente como el décimo punto en la lista de factores limitadores de la energía. Sin embargo, creemos que este factor es tan importante como para merecer una discusión separada.

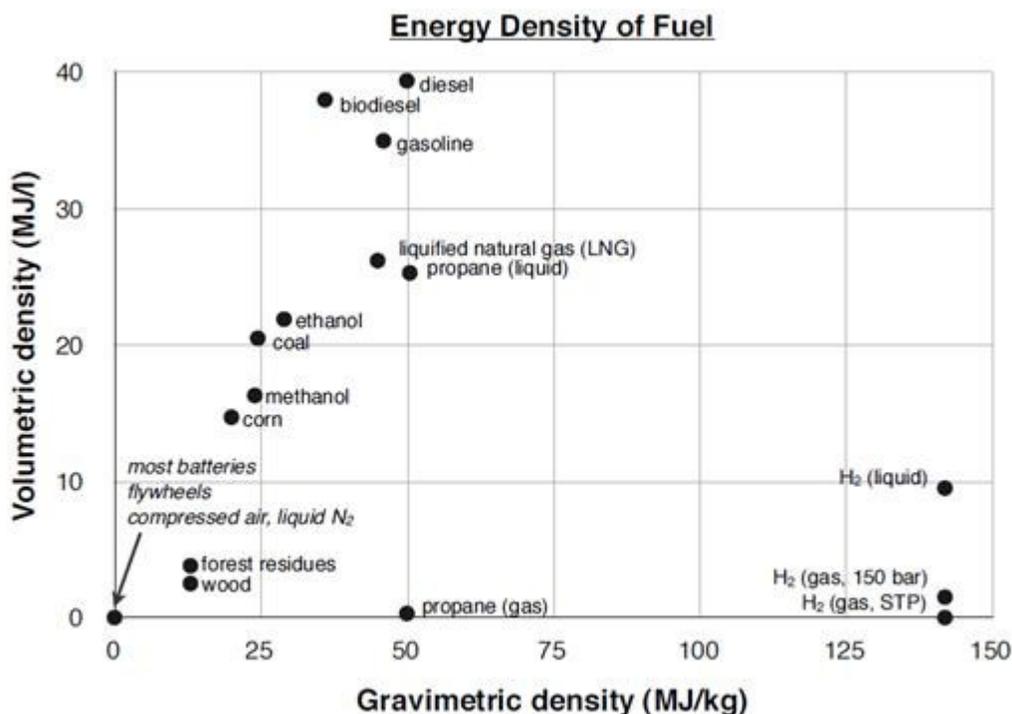


Diagrama 1: Densidad volumétrica y gravimétrica de los combustibles. Un *fuel hipotético* con

unas características de densidad de energía ideales ocuparía la esquina superior derecha del diagrama. Las fuentes de energía que aparecen en la esquina inferior izquierda tienen las peores características de densidad de energía. H2 se refiere al hidrógeno –como líquido superenfriado, como gas presurizado y a “una temperatura y presión estándares.”

Tres

EL DÉCIMO CRITERIO: “ENERGÍA NETA” (EROEI)

Como ya se mencionó, la *energía neta* se refiere a la proporción entre la cantidad de energía producida y la cantidad de energía gastada en producirla. Algo de energía se debe utilizar siempre para obtener nuevos suministros de energía, independientemente de la naturaleza del recurso energético o de la tecnología utilizada para obtenerlo. La sociedad depende de los excedentes de energía neta obtenidos de los esfuerzos para capturar energía para poner en marcha todos sus sistemas de manufactura, distribución y mantenimiento.

Dicho de forma ligeramente diferente, la energía neta significa la cantidad de energía útil que queda después que la energía invertida en perforar, transportar por oleoducto, refinar o construir infraestructuras (incluyendo los paneles solares, las turbinas de viento, los pantanos, los reactores nucleares o las plataformas de perforación) haya sido restada de la cantidad total de energía producida de una fuente dada. Si diez unidades de energía se “invierten” para desarrollar fuentes de energía adicionales, uno espera como resultado 20 unidades o 50 o 100. La “energía de salida” debe exceder a la “energía de entrada” tanto como sea posible. La energía neta es la que queda que se puede emplear para realmente hacer más trabajo. Puede ser pensada como el “beneficio” de la inversión de los recursos de energía buscando nueva energía.

RETORNOS DE INVERSIÓN (EROEI)

El concepto de energía neta tiene una obvia semejanza con un concepto familiar para cualquier economista o empresario: *el retorno de inversión*, o *ROI* [*return on investment*]. Cualquier inversor sabe que hace falta dinero para ganar dinero; cualquier gestor de un negocio es profundamente consciente de la importancia de mantener un ROI positivo; y cualquier capitalista en inversiones de riesgo aprecia la potencial rentabilidad de una inversión con una ROI alta. Mantener un *retorno de energía sobre la energía invertida* (EROEI) positivo es tan importante para los productores de energía como para la sociedad en su conjunto. (Algunos escritores, deseando evitar la redundancia, prefieren el más simple EROI; pero como hay una gran posibilidad de que algunos lectores asuman que esto significa *retorno de energía por dinero invertido*, hemos preferido el término más largo y menos elegante). La proporción de EROEI se expresa típicamente como producción por unidad de *input*, así 1 sirve como denominador de la proporción (por ejemplo, 10/1 o 10:1). A veces el denominador simplemente se asume, así que se podría escribir que la EROEI de la fuente de energía es 10 – queriendo decir, una vez más, que se obtienen diez unidades de energía por cada una invertida en el proceso productivo-. Una EROEI de menos de 1, por ejemplo, 0,5 (que se puede escribir también como 0,5/1 o 0,5:1) indicaría que la energía que se está obteniendo de una fuente particular es solamente la mitad de la cantidad de energía invertida en el proceso de producción. Como veremos, se pueden esperar retornos muy bajos de energía neta en algunas nuevas fuentes de energía que se intentan promocionar, como el etanol de celulosa. Y como también veremos, la energía neta de fuentes anteriormente muy productivas como el petróleo y el gas natural, que solía ser de más de 100:1, ha disminuido sin cesar hasta ser hoy una fracción de esa proporción.

A veces la el retorno de energía por inversión (EROEI) se discute en términos de “amortización de

tiempo de la energía”, es decir, la cantidad de tiempo que necesitará un sistema de producción de energía dado (como un conjunto de paneles solares) antes de funcionar para producir tanta energía como fue gastada para construir e instalar el sistema. Esta formulación tiene sentido para sistemas (como los paneles FV) que requieren poco o nada en costes de gestión operacional y mantenimiento una vez el sistema está instalado.

REEMPLAZO DE LA ENERGÍA HUMANA

Si pensamos en la energía neta no simplemente en cómo impacta en un proceso de producción de energía particular, sino en cómo impacta en la sociedad en su conjunto, el tema tiene una importancia añadida.

Cuando la energía neta producida es una gran parte del total de energía producida (por ejemplo, una proporción de energía neta de 100:1), esto significa que la mayor parte del total de energía producida se puede utilizar para otros propósitos que no sean la producción de más energía. Se necesita que se dedique a la producción de energía una porción relativamente pequeña del esfuerzo social, y la mayor parte de los esfuerzos de la sociedad se pueden dirigir hacia actividades que mantienen un rango de ocupaciones especializadas no asociadas con la producción de energía. Esta es la situación a la que nos hemos acostumbrado como resultado de haber tenido un siglo de acceso a combustibles fósiles baratos y abundantes –todos ellos ofreciendo relaciones de retorno de energía relativamente altas durante la mayor parte del siglo XX-.

Por otra parte, si la energía neta producida es una pequeña fracción del total de energía producida (por ejemplo una proporción de 10:1 o menos), esto implica que una parte relativamente grande de la energía disponible debe dedicarse a más producción de energía, y solo una pequeña parte de la energía disponible para la sociedad se puede dirigir a otros objetivos. Este principio se aplica con independencia del tipo de energía del que dependa la sociedad –ya sea energía fósil o energía eólica o energía en la forma de cosechas de alimentos-. Por ejemplo, en una sociedad en la que la energía (en la forma de calorías de comida) se adquiere principalmente mediante una agricultura con trabajo intensivo –que rinde un “beneficio” energético bajo y variable-, la mayor parte de la población debe dedicarse a las tareas agrícolas para proporcionar suficiente beneficio de energía para mantener una pequeña jerarquía de gestores, mercaderes, artistas, funcionarios del gobierno, soldados, mendigos, etc. que componen el resto de la sociedad y que gastan energía en lugar de producirla.

EL APOGEO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

En las primeras décadas de la era de los combustibles fósiles (finales del siglo XIX y la mayor parte del siglo XX), las cantidades de energía total y de energía neta que fueron liberadas mediante la minería y la perforación de tales combustibles no tuvieron precedentes. Fue la súbita abundancia de energía barata lo que permitió el crecimiento de la industrialización, la especialización, la urbanización y la globalización que han dominado los pasados dos siglos. En esa era se necesitaba solamente una insignificante cantidad de esfuerzo en exploración, perforación o minería para obtener un enorme retorno de energía invertida (EROEI). En aquel tiempo, la industria de la energía comprensiblemente siguió la política de lo mejor primero o “el fruto que cuelga más bajo” en exploración y extracción. Así, el carbón, el petróleo y el gas que tenían más calidad y cuyo acceso era más fácil tendían a ser encontrados y extraídos con preferencia. Pero con el paso de cada década la energía neta (comparada con la energía total) obtenida de la extracción de combustibles fósiles ha *disminuido* a medida que los productores de energía han tenido que hacer prospecciones en lugares menos convenientes y que contar con recursos de un grado menor. En los primeros años de la industria del petróleo estadounidense, por ejemplo, una proporción de beneficio de energía de 100 a uno era normal, mientras ahora se estima que los esfuerzos de exploración de los EEUU están descendiendo a una media de uno a uno (quedando a la

par) en la relación de amortización de energía.[\[10\]](#)

Además, como veremos con más detalle más tarde en este informe, las alternativas que se proponen actualmente a los combustibles fósiles convencionales generalmente tienen un EROEI mucho más bajo que el que tuvieron el carbón, el petróleo o el gas en sus respectivos apogeos. Por ejemplo, la producción de etanol industrial a partir del maíz se estima actualmente que tiene como mucho un balance de energía neta positiva de 1,8:1[\[11\]](#); es por tanto prácticamente inútil como fuente de energía primaria. (Dicho entre paréntesis, vale la pena señalar que el cálculo citado para el etanol puede en realidad exagerar la ganancia de energía neta del etanol industrial porque incluye el valor de la energía del subproducto de la producción –granos secos destilados con solubles (DDGS), que pueden alimentar el ganado- en la columna de “salida de energía”; pero si el foco del análisis trata simplemente de valorar la cantidad de energía utilizada para producir una unidad de etanol de maíz, y se descarta por tanto el valor de los DDGS, el EROEI es incluso menor, de 1,1 según el mismo estudio.)

CÓMO LA EROEI DA FORMA A LA SOCIEDAD

Como se dijo anteriormente, si el beneficio de energía neta disponible en una sociedad disminuye, un mayor porcentaje de recursos de la sociedad deberá ser dedicado directamente a obtener energía, incrementando así su coste. Esto significa que habrá menos energía disponible para todas las actividades que la energía hace posibles. Se puede pensar en la energía neta en términos del número de personas en una sociedad que se necesitan en la producción de energía, incluyendo la producción de comida. Si la energía retornada equivale exactamente a la energía invertida (EROEI = 1:1), todo el mundo debe participar en las actividades de producción de energía y no hay nadie disponible para hacerse cargo de otras necesidades de la sociedad. En las sociedades pre-industriales, la mayor parte de la energía reunida lo era en la forma de energía alimentaria, y la mayor parte de la energía gastada lo era en forma de energía muscular (en los EEUU, tan recientemente como 1850, más del 65 por ciento de todo el trabajo era realizado a fuerza de músculo, contra menos del 1 por ciento actual, ya que las máquinas alimentadas con combustible realizan prácticamente todo el trabajo). No obstante, exactamente el mismo principio de energía neta aplicado a estos sistemas de energía basada en el alimento se aplica a nuestra moderna economía dominada por los combustibles, la electricidad y las máquinas. Esto es, la gente capturaba energía de su medio ambiente (principalmente en la forma de cosechas más que en la de combustibles fósiles), y ese proceso requería la inversión de energía (principalmente mediante el esfuerzo muscular); el éxito dependía de la capacidad de producir más energía de la que se invertía. Cuando la mayor parte de la población participaba en la producción de energía mediante el cultivo o la recolección de alimentos, las sociedades eran más sencillas según diversos criterios de medición: había menos ocupaciones especializadas a tiempo completo y menos clases de herramientas en uso.

La arqueóloga Lynn White estimó que las sociedades cazadoras-recolectoras funcionaban sobre una base de energía neta de diez a uno (EROEI=10:1).[\[12\]](#) En otras palabras, por cada unidad de esfuerzo que los primeros humanos gastaban en cazar o en recoger plantas silvestres, obtenían una media de diez unidades de energía alimentaria a cambio. Usaban el excedente de energía para todas sus actividades sociales (reproducción, cría de los hijos, contar historias, y demás) que hacían la vida sostenible y gratificante. Dado que las sociedades cazadoras-recolectoras son los grupos humanos más simples en términos de tecnología y grado de organización social, 10:1 debería ser visto probablemente como la media mínima de EROEI social requerida para el mantenimiento de la existencia humana (aunque no hay duda de que grupos de humanos sobrevivieron en periodos ocasionales, de hasta varios años de duración, con un EROEI mucho más bajo).

La mayor complejidad de las primeras sociedades agrarias se basaba, no tanto en un EROEI

aumentado, como en mayores niveles de inversión de energía en la forma de trabajo (los campesinos normalmente trabajan más que los cazadores recolectores) junto con la introducción del almacenamiento de comida, la esclavitud, la domesticación de los animales y ciertas herramientas clave como el arado y el yugo.

Sin embargo, la transición a la sociedad industrial, que implica niveles de complejidad mucho mayores, solo hubiera podido ser posible con ambas cosas: *inputs* de energía totales más altos y la EROEI mucho más alta que permitían los combustibles fósiles.

LOS LÍMITES DE LA EROEI EN LAS OPCIONES ENERGÉTICAS

Tanto las fuentes de energía renovables como las no renovables están sujetas al principio de la energía neta. Los combustibles fósiles dejan de ser útiles como fuentes de energía cuando la energía necesaria para extraerlos es igual o excede a la energía que se puede obtener al quemarlos.

Este hecho pone un límite físico a la parte de recursos de carbón, petróleo o gas que puede ser categorizada como reservas, puesto que la energía neta disminuirá hasta el punto en que se quede a la par con la empleada en su obtención mucho antes de que las reservas de energía fósil extraíbles se agoten. Por tanto, la necesidad para la sociedad de encontrar recambio a los combustibles fósiles puede ser más urgente de lo que se generalmente se reconoce. Aunque queden grandes cantidades de combustibles fósiles por extraer, la transición a fuentes de energía alternativas debe ser puesta en marcha mientras haya suficiente energía neta disponible para continuar dando energía a la sociedad mientras al mismo tiempo proporcione energía para el proceso de transición en sí. La energía neta puede tener un efecto directo en nuestra capacidad para mantener la sociedad industrial en su nivel actual. Si la energía neta de todas las fuentes de energía combinadas disminuye, cada vez se sentirán más limitaciones para el crecimiento económico, pero también para nuevas estrategias adaptativas para actuar frente a las actuales crisis energética y climática. Por ejemplo, cualquier clase de transición energética adaptativa exigirá nuevas inversiones sustanciales para la construcción de edificios más eficientes energéticamente y/o infraestructuras públicas de transporte. Sin embargo, tales requerimientos llegarán al mismo tiempo que se necesitarán más inversiones en los sistemas de producción de energía. Puede suceder que las sociedades simplemente no sean capaces de proveer adecuadamente de fondos a ambos conjuntos de necesidades simultáneamente. Los síntomas perceptibles de presión incluirían el incremento de los costes de las necesidades básicas y una reducción en las oportunidades de trabajo en campos no asociados con la producción básica. Proporcionar la energía necesaria simplemente para mantener la infraestructura existente, o para mantener aspectos de esa infraestructura considerados esenciales, se convertirá en un reto creciente.

EROEI: DIFERENCIA CON LA EFICIENCIA

La EROEI de los procesos de *producción* de energía no debería confundirse con la eficiencia de los procesos de *conversión* de energía, esto es, la conversión de energía de las fuentes combustibles fósiles, o el viento, etc. en electricidad utilizable o trabajo útil. La conversión de la energía es siempre menor a un cien por cien de eficiencia –algo de energía se pierde invariablemente en el proceso (la energía no se puede destruir, pero se puede disipar fácilmente de forma que deje de ser útil para propósitos humanos)- pero los procesos de conversión son sin embargo cruciales al usar energía. Por ejemplo, en un sistema de energía con muchas fuentes que lo alimenten, los *portadores de energía* más habituales son extremadamente útiles. La electricidad es actualmente el portador de energía dominante, y cumple bien su función.

Sería difícil que los consumidores hiciesen un uso práctico del carbón, la energía nuclear y la hidroeléctrica sin electricidad. Pero la *conversión* de la fuente de energía original de los combustibles fósiles, el uranio, o el agua que fluye, en electricidad implica un coste energético. El objetivo de los ingenieros es reducir ese coste de energía hasta hacer que la conversión sea lo más eficiente posible. Pero si la fuente de energía tiene características deseables, incluso un relativamente alto coste de conversión en términos de ‘pérdida’ de energía se puede soportar fácilmente. Muchas plantas de producción energética a partir del carbón actualmente en funcionamiento en los EEUU tienen una eficiencia de conversión de energía de solo un 35 por ciento. De forma similar, algunos motores son más eficientes que otros en términos de su capacidad para convertir la energía en trabajo.

Los análisis de EROEI no se centran en la eficiencia de la conversión *per se*, sino que tienen en cuenta todos los costes razonables en el lado del libro de contabilidad de la ‘energía invertida’ en la *producción* de energía (como la energía necesaria para la minería o la perforación, y para la construcción de infraestructuras), y entonces sopesa ese total contra la cantidad de energía obtenida para realizar trabajo.

Dado que este informe es una guía para personas que no son especialistas, no podemos entrar en profundidad en el proceso técnico del cálculo de energía neta.

EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA NETA: IMPRECISA, PERO ESENCIAL PARA LA PLANIFICACIÓN

El uso de la energía neta o EROEI como criterio para evaluar las fuentes de energía se ha criticado en diversas ocasiones[13]. La crítica fundamental se centra en la dificultad de establecer límites de sistema que sean aceptables para todas las partes interesadas, y que se puedan trasladar fácilmente del análisis de una fuente de energía a otra. Más aún, la EROEI de algunas fuentes de energía (como la solar, la eólica y la geotérmica) pueden variar enormemente en función de la localización del recurso frente a sus mercados más importantes. Los avances en la eficiencia de la tecnología de soporte pueden afectar también a la energía neta. Todos estos factores hacen difícil calcular cifras que puedan resultar fiables en la planificación energética.

Esta dificultad se incrementa cuando el examen de los procesos de producción de energía se hace más detallado: ¿Necesita en realidad el personal de oficina de una compañía petrolera conducir hasta la oficina para producir petróleo? ¿Importa el tipo de coche? ¿La energía gastada en rellenar formularios de devolución de impuestos es en realidad necesaria para la fabricación de paneles solares? Aunque tales costes de energía no se incluyen normalmente en los análisis de EROEI, alguien podría argumentar que tales costes auxiliares deberían ser tenidos en cuenta para tener un cuadro más detallado de los costos de oportunidad[14]. Pero a pesar de los retos en la contabilidad precisa de la energía utilizada para producir energía, los factores de energía neta actúan como una limitación real en la sociedad humana, independientemente de si los ignoramos o les prestamos gran atención, porque la EROEI determinará si una fuente de energía es capaz de dar soporte con éxito a una sociedad de un cierto tamaño y nivel de complejidad. ¿Qué tecnologías alternativas tienen suficientemente altos ratios de energía neta para ayudar a mantener la sociedad industrial tal como la hemos conocido en el pasado siglo? ¿Hay alguna? ¿O lo será una combinación de alternativas? Aunque hay discusión sobre las cifras exactas, en las situaciones en las que la EROEI se pueda determinar que sea muy baja, podemos concluir que la fuente de energía en cuestión no puede ser considerada una fuente primaria para mantener una economía industrial.

Muchas de las críticas de los análisis de energía neta se reducen a una insistencia en que otros factores que limitan la eficacia de las fuentes de energía deberían también ser considerados. Estamos de acuerdo. Por ejemplo, el EROEI no tiene en cuenta los límites de los *inputs no energéticos* en la producción de energía (como el agua, el suelo o los minerales y metales necesarios para producir equipamiento); no tiene en cuenta los *outputs* no energéticos indeseables del proceso de producción de energía –muy notablemente, los gases de efecto invernadero-; no tiene en cuenta la calidad de la energía (el hecho, por ejemplo, de que la electricidad es intrínsecamente un medio de distribución de la energía más versátil y útil que la fuerza muscular de los caballos); y no refleja la escalabilidad de la fuente de energía (recordemos el anterior ejemplo del gas de vertedero).

El retorno de energía *podría* ser calculado incluyendo el uso de *inputs* no energéticos –por ejemplo, el retorno de energía según el *agua* invertida, o el retorno de energía según la *tierra* invertida-. A medida que la energía neta disminuye, el retorno de energía de la inversión de *inputs* no energéticos es probable que también disminuya, quizá incluso más rápidamente. Por ejemplo, cuando el combustible se obtiene de arenas asfálticas en lugar de campos petrolíferos convencionales, se necesitan más tierra y agua como *inputs*; hay una situación equivalente cuando se sustituyen los biocombustibles por gasolina. Una vez una sociedad entra en una era de una EROEI de un solo dígito de media, es decir, un *output* contra un *input* de energía menor que 10:1, un mayor porcentaje de energía y recursos no energéticos (agua, trabajo, tierra y demás) tendrá que ser destinado a la producción de energía. Esto tiene relevancia en la discusión sobre biocombustibles y tecnologías similares de baja ganancia de energía. A primera vista, podrían parecer mejores que los combustibles fósiles ya que se producen a partir de fuentes renovables, pero usan fuentes de energía no renovables que tienen un rendimiento neto decreciente (a medida que los recursos de mayor calidad se agotan). Pueden necesitar grandes cantidades de tierra, agua y fertilizantes; y a menudo implican un daño medioambiental (como hacen los combustibles fósiles por sí mismos). Todas las nuevas fuentes de energía que se proponen deberían ser evaluadas en un marco que considere estos otros factores (retorno de energía por agua, trabajo, tierra, etc.), igual que la energía neta.[\[15\]](#)O, se podría pensar en una nueva EROEI de múltiples facetas.

En cualquier caso, aunque la energía neta no es el único criterio importante para valorar una potencial fuente de energía, esta no es una razón suficiente para ignorarla. El EROEI es una base necesaria –aunque incompleta- para evaluar las fuentes de energía. Es uno de los *cinco* criterios que creemos deberían ser vistos como los que tienen un estatus definitivo. Los otros criterios críticos, ya discutidos en la Parte I son: capacidad de renovación, impacto medioambiental, tamaño del recurso, y necesidad de recursos y materiales complementarios. Si una fuente de energía potencial no puede cumplir estos cinco criterios, no se puede considerar de forma realista una futura fuente de energía primaria. Dándole la vuelta, una fuente de energía potencial primaria puede ser descalificada si no cumple alguno de estos cinco criterios.

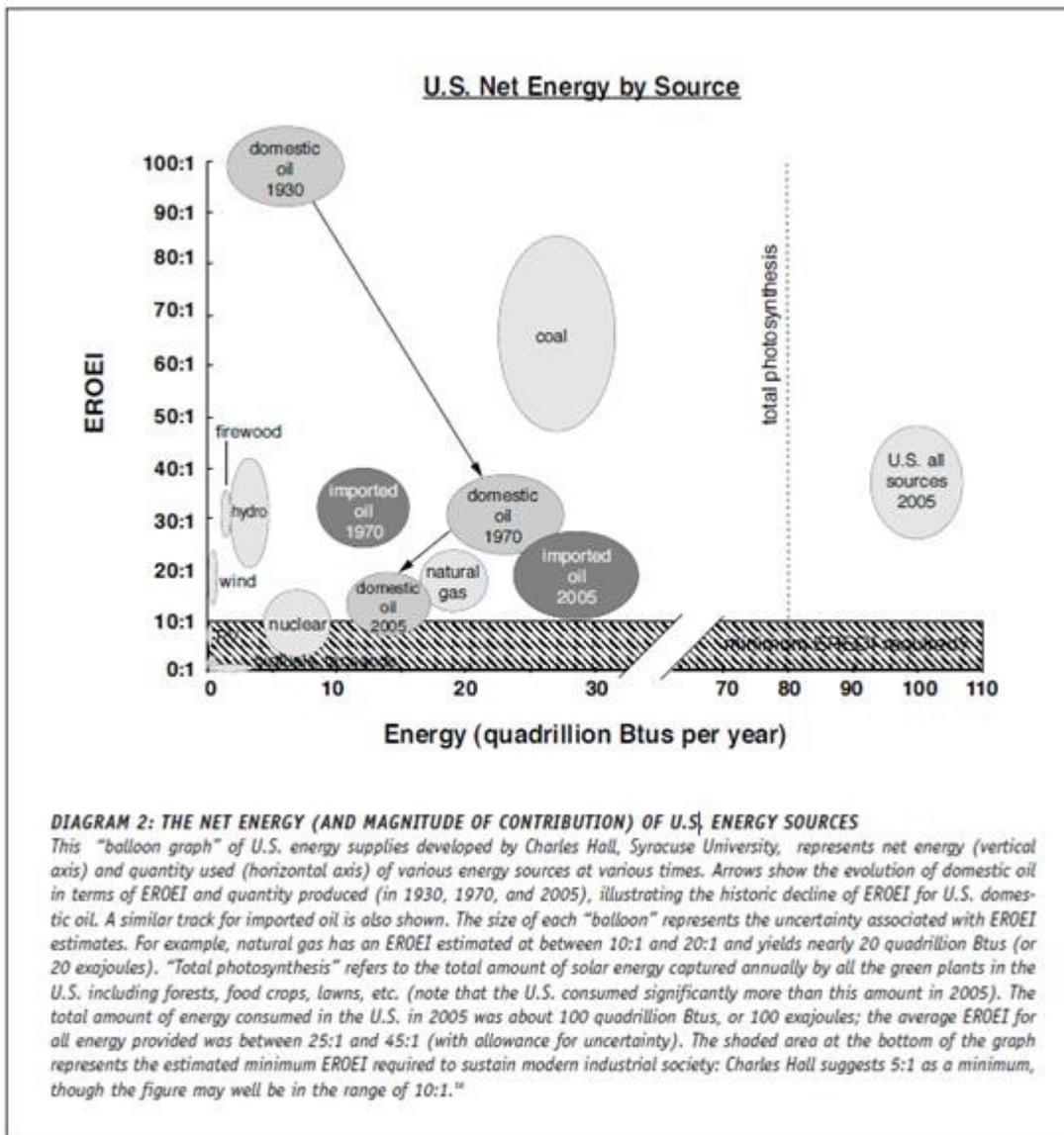


Diagrama 2: La energía neta (y magnitud de su contribución) de las fuentes de energía en los EEUU

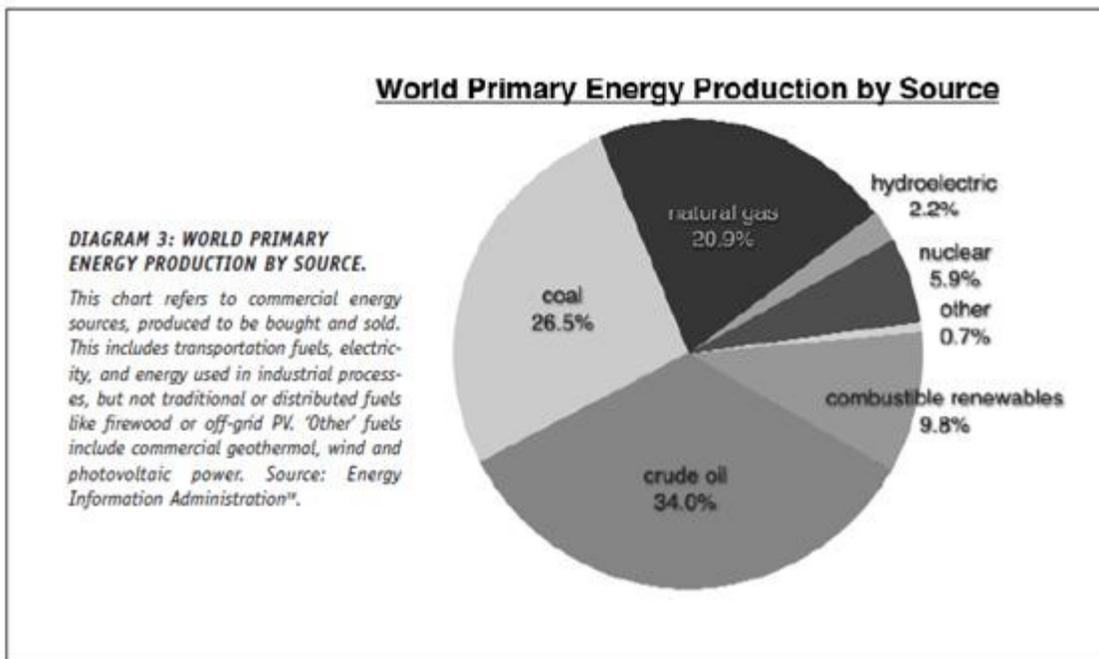
Este “gráfico de globo” de los suministros de energía en los EEUU desarrollada por Charles Hall, de la Universidad de Syracuse, representa la energía neta (eje vertical) y la cantidad utilizada (eje horizontal) de diversas fuentes de energía en diversos periodos. Las flechas muestran la evolución del petróleo nacional en términos de EROEI y cantidad producida (en 1930, 1970 y 2005), ilustrando el declive histórico de la EROEI del petróleo de los EEUU. Se muestra también un recorrido similar para el petróleo importado. El tamaño de cada “globo” representa la incerteza asociada a las estimaciones de EROEI. Por ejemplo, el gas natural tiene una EROEI estimada de entre 10:1 Y 20:1 y un rendimiento de 20 trillones de BTU (o 20 exajulios). El “total de fotosíntesis” se refiere a la cantidad total de energía solar capturada anualmente por todas las plantas verdes en los EEUU incluyendo bosques, cosechas, prados, etc. (nótese que los EEUU consumieron significativamente más que esta cantidad en 2005). La cantidad total de energía consumida en los EEUU en 2005 fue de unos 100 trillones de BTUs, o 100 exajulios. La EROEI media para toda la energía proporcionada fue de entre 25:1 y 45:1 (con cierta tolerancia a la incerteza). El área sombreada en la parte inferior del gráfico representa la EROEI mínima estimada necesaria para mantener una sociedad industrial moderna: Charles Hall

sugiere 5:1 como mínimo, aunque la cifra bien podría estar en el rango de 10:1. [16]

Cuatro

VALORACIÓN Y COMPARATIVA DE DIECIOCHO FUENTES DE ENERGÍA

En este capítulo discutiremos y compararemos con más detalle los atributos clave, tanto positivos como negativos, de dieciocho fuentes de energía específicas. Los datos sobre energía neta (EROEI) para la mayor parte de ellas se han extraído en gran parte del trabajo del Dr. Charles Hall quien, junto a sus estudiantes de la Universidad Estatal de Nueva York en Syracuse, ha estado durante muchos años al frente del desarrollo y aplicación de la metodología para el cálculo de las ratios de retorno de energía. [17] Empezaremos con las fuentes de energía actualmente dominantes, caso por caso, incluyendo el petróleo, el carbón y el gas de forma que se puedan hacer comparaciones con sus potenciales recambios. Tras los combustibles fósiles exploraremos las perspectivas de diversas fuentes no fósiles. En total, se discuten en esta sección dieciocho fuentes de energía, ordenadas aproximadamente según el tamaño de su contribución actual al suministro mundial de energía.



[18]

1. PETRÓLEO

Como principal fuente de energía actual a nivel mundial, el petróleo proporciona combustible a todo el transporte global –coches, aviones, trenes y barcos-. (Las excepciones, como los coches eléctricos, los metros y trenes, y los barcos a vela, son una parte estadísticamente insignificante del total de transporte).

El petróleo proporciona alrededor del 34 por ciento de la energía total mundial, o alrededor de 181 EJ por año. El mundo utiliza actualmente alrededor de 75 millones de barriles de petróleo por día, o veintisiete mil millones de barriles por año [19], y la cantidad de reservas es de alrededor de un billón de barriles (aunque la cifra es discutida).

A FAVOR: Las razones por las que el petróleo ha sido tan importante son varias de sus características más básicas: se puede transportar fácilmente como líquido a temperatura ambiente y se puede

almacenar también con facilidad. Y su densidad de energía –un litro de petróleo contiene 38 MJ de energía química, tanta energía como la producida por una persona trabajando diez horas diarias durante dos semanas-.[\[20\]](#)

Históricamente, el petróleo ha sido barato de producir y se puede conseguir con una huella en la tierra muy pequeña.

EN CONTRA: Los inconvenientes del petróleo son tan claros como sus ventajas. Su impacto medioambiental negativo es enorme.

La extracción es especialmente dañina en los países más pobres como Ecuador, Perú y Nigeria, donde la industria tiende a gastar lo mínimo en los esfuerzos para poner remedio, obligatorios por ley en los EEUU; como resultado, ríos y pantanos son envenenados, se contamina el aire, y los pueblos indígenas ven sus formas de vida destruidas.

Además, quemar petróleo libera dióxido de carbono, lo que modifica el clima (alrededor de 800 a 1000 libras de CO₂ por barril[\[21\]](#), o 70 kg de CO₂ por GJ), así como otras sustancias contaminantes como óxidos de nitrógeno y partículas.

Y lo que es más importante, el petróleo no se puede renovar, y muchos de los campos petrolíferos más grandes están ya agotados de forma importante. La mayor parte de los países productores de petróleo están viendo la disminución de las tasas de extracción, y las futuras fuentes de combustible se encuentran progresivamente concentradas en muy pocos países –principalmente, los países de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). La escasez geográfica de depósitos de petróleo ha llevado a una competencia por los suministros, y a veces a guerras por el acceso a los recursos. A medida que el petróleo se vuelva más escaso debido al agotamiento, podemos anticipar guerras por el petróleo aún peores.[\[22\]](#)

EROEI: La energía neta (comparada con la energía bruta) de la producción mundial de petróleo es difícil de determinar con precisión, porque muchos de los principales países productores no publican con facilidad estadísticas que hagan posible cálculos detallados. Se necesitan alrededor de 750 julios de energía para subir 15 kg de petróleo 5 metros –la inversión absoluta mínima de energía para bombear petróleo que ya no fluye simplemente fuera del terreno bajo presión (aunque buena parte del petróleo mundial todavía lo hace)-. Pero también se gasta energía en exploración, perforación, refinado y demás. Se puede obtener un número total aproximado dividiendo la energía producida por la industria petrolera mundial por *la energía equivalente de los dólares gastados* por la industria petrolera en la exploración y producción (es un cálculo aproximado de la cantidad de energía utilizada en la economía para producir una riqueza de un dólar de bienes y servicios). Según Charles Hall, este número –para el petróleo y el gas conjuntamente- era de unos 23:1 en 1992, aumentó a 32:1 en 1999, y desde entonces ha disminuido sin cesar alcanzando 19:1 en 2005. Si la reciente trayectoria se proyecta hacia el futuro, la EROEI para el total de petróleo y gas disminuiría a 10:1 poco después de 2010. Hall y sus colegas encontraron que para los EEUU (un país cuyas inversiones en la industria petrolera y cuyas estadísticas de producción de petróleo son transparentes), la EROEI en el pozo era aproximadamente 26:1 en 1992, se incrementó a 35:1 en 1999, y después disminuyó a 18:1 en 2006.[\[23\]](#)

Es importante recordar que la estimación de Hall de 19:1 para el total mundial es una media: algunos productores disfrutaban de unas ganancias de energía neta mucho mayores que otros. Hay buenas razones para suponer que la mayor parte de los productores de petróleo con una alta EROEI son países miembros de la OPEP.

PERSPECTIVAS: Como ya se ha mencionado, la producción de petróleo está en declive en la mayor parte de los países productores, y casi todos los mayores campos petrolíferos del mundo están asistiendo una caída en la producción.

El pico máximo de la producción de petróleo probablemente se produjo en julio de 2008, con 75 millones de barriles por día.[\[24\]](#) En ese momento, el precio por barril se había disparado hasta un máximo de 147\$. Desde entonces, la demanda decreciente y la caída de los precios ha llevado a los países productores a cortar el bombeo. La disminución del precio ha llevado también a una significativa ralentización de la inversión en exploración y producción, lo que prácticamente garantiza déficits de producción en el futuro. Parece por tanto improbable que la tasa de producción de julio de 2008 sea superada alguna vez.

La disminución de la EROEI y los límites a la producción mundial de petróleo limitarán por tanto la actividad económica mundial en el futuro, a no ser que se puedan encontrar alternativas al petróleo y se pongan en marcha de forma extremadamente rápida.

2. CARBÓN

La Revolución Industrial fue posible en gran parte gracias a la energía del carbón. Además de ser el combustible primario para la expansión de la manufactura, fue utilizado también para calefacción y cocina. Hoy, la mayor parte del carbón se quema para la producción de electricidad y para hacer acero.

El carbón ha sido la fuente de energía de más rápido crecimiento (por cantidad) en los últimos años debido al prodigioso crecimiento del consumo en China, que es de lejos el productor y consumidor más destacado del combustible. Los principales depósitos mundiales de carbón se encuentran en los EEUU, Rusia, la India, China, Australia y Sudáfrica. Se estima que las reservas mundiales de carbón son 850 mil millones de toneladas métricas (aunque es una cifra en disputa), con una producción anual un poco por encima de las cuatro mil millones de toneladas. El carbón produce 134,6 EJ anualmente, o el 27 por ciento del total de energía mundial. Los EEUU basan en el carbón el 49 por ciento de su electricidad y un 23 por ciento del total de energía.[\[25\]](#)

La densidad de energía por peso del carbón es muy variable (desde 30 MJ/kg para la antracita de alta calidad a tan poco como 5,5 MJ/kg para el lignito).

A FAVOR: El carbón actualmente es un combustible barato y fiable para la producción de electricidad. Se almacena fácilmente, aunque sea voluminoso. Se puede transportar por tren o por barco (el transporte con camión para largas distancias es raramente viable desde un punto de vista energético y económico).

EN CONTRA: El carbón tiene el peor impacto medioambiental de todos los combustibles fósiles convencionales, tanto en el proceso de obtener el combustible (minería) como en el de quemarlo para liberar energía. Dado que el carbón es el combustible fósil convencional que tiene más carbono (se emiten 94 kg de CO₂ por cada GJ de energía producida), es la fuente principal de emisiones de gases de efecto invernadero que llevan al cambio climático, aunque contribuya con menos energía a la economía mundial que el petróleo.

El carbón no es renovable, y algunos países (el Reino Unido y Alemania) han utilizado ya la mayor parte de sus reservas originales de carbón. Incluso los Estados Unidos, la “Arabia Saudí del carbón”, están viendo una disminución de la producción de sus depósitos de más calidad.

EROEI: A principios del siglo XX, la energía neta del carbón de los EEUU era muy alta, con una media de 177:1 según un estudio[26], pero ha caído sustancialmente a un rango de entre 50:1 a 85:1. Más aún, sigue la disminución, con una estimación que indica que para 2040 la EROEI del carbón de los EEUU será de 0,5:1[27].

PERSPECTIVAS: Aunque las cifras oficiales de reservas indican que los suministros mundiales de carbón serán suficientes para un siglo o más, recientes estudios sugieren que pueden aparecer límites de suministro a nivel mundial, y especialmente a nivel regional, mucho antes. Según un estudio de 2007 del Grupo de Observación de la Energía de Alemania, la producción mundial de carbón es probable que llegue a su pico alrededor de 2025 o 2030, con un declive gradual a partir de entonces. El pico de producción de China podría llegar antes si el crecimiento económico (y por tanto el crecimiento de la demanda de energía) vuelve pronto. En los EEUU la producción de carbón puede llegar al pico en el periodo entre 2030 y 2035.

Las nuevas tecnologías del carbón, como la captura y almacenamiento de carbono (CCS) podría en teoría reducir el impacto en el clima del carbón, pero con un coste económico y energético importante (según una estimación hasta el 40 por ciento de la energía del carbón se destinaría a mitigar el impacto sobre el clima, mientras el otro 60 por ciento se podría utilizar para trabajo económicamente útil; también habría un coste medioambiental por el daño debido a los trabajos adicionales de minería necesarios para producir el carbón extra necesario para compensar los costes energéticos del CCS).[28]

Los precios del carbón aumentaron sustancialmente en 2007-2008 a medida que la economía global se calentaba, lo que sugiere que el sistema existente de oferta mundial de carbón estaba entonces cerca de su límite. Los precios han disminuido bruscamente desde entonces como resultado de la crisis económica mundial y la caída de la demanda energética. Sin embargo, los precios del carbón casi con toda certeza aumentarán en el futuro, en términos ajustados a la inflación –o deflación-, a medida que los depósitos de alta calidad se vayan agotando y cuando la demanda de energía se recupere de su bajo nivel debido a la actual recesión.

3. GAS NATURAL

Formado por procesos geológicos similares a los que produjeron el petróleo, el gas natural a menudo se encuentra junto al petróleo líquido. En los primeros años de la industria del petróleo, el gas simplemente era quemado en la boca del pozo; hoy es visto como un recurso energético valioso y se usa en todo el mundo para calefacción y cocina; tiene también muchos usos industriales en los que se necesitan altas temperaturas y se quema cada vez más para generar electricidad. El gas natural proporciona un 25 por ciento de la energía total mundial. Las reservas mundiales son unos 6,3 billones de pies cúbicos, lo que representa una cantidad de energía equivalente a 890 mil millones de barriles de petróleo.[29]

A FAVOR: El gas natural es el combustible fósil que tiene menos carbono (alrededor de 53 kg de CO₂ por GJ). Como el petróleo, el gas natural es denso energéticamente (más por peso que por volumen), y se extrae dejando una pequeña huella en tierra. Se transporta fácilmente a través de sistemas de gaseoductos y bombas, aunque no se puede transportar por barco tan cómodamente como el petróleo, porque normalmente requiere presurización a muy bajas temperaturas.

EN CONTRA: El gas natural es un hidrocarburo, lo que significa que al quemarse libera CO₂ aunque las cantidades sean menores que lo que sería el caso con una cantidad similar de energía procedente del carbón o el petróleo. Como el petróleo, el gas natural no es renovable y está disminuyendo. El impacto

medioambiental de la producción de gas natural es similar al del petróleo. Recientes disputas entre Rusia, Ucrania y Europa acerca de los suministros de gas natural subrayan la creciente competencia geopolítica para acceder a este valioso recurso. El transporte internacional y el comercio del gas natural licuado (GNL) implican situar y construir terminales de descarga que pueden ser extremadamente peligrosas.

EROEI: La energía neta del gas natural es incluso más difícil de calcular que la del petróleo, porque las estadísticas de petróleo y gas a menudo están agregadas. Un reciente estudio que incluye tanto la energía directa (el combustible diesel usado para perforar y completar un pozo) como la energía indirecta (usada para producir materiales como el acero y el cemento consumido en el proceso de perforación) descubrió que en 2005, la EROEI de los campos gasísticos de los EEUU era 10:1. [30] No obstante, nuevas tecnologías “no convencionales” de extracción de gas natural (bolsas de metano y producción a partir de embalses de baja porosidad usando la tecnología de ‘fracturación’) probablemente tengan rendimientos de energía neta significativamente más bajos: la tecnología en sí consume más energía en la producción y los pozos se agotan rápidamente, requiriendo así el aumento de las tasas de perforación para rendir cantidades de gas equivalentes. Así, mientras el gas convencional se agota y el gas no convencional constituye una mayor proporción de la producción total, la EROEI de la producción de gas natural en Norteamérica disminuirá, posiblemente de manera espectacular.

PERSPECTIVAS: Durante los últimos años, Norteamérica ha evitado una crisis en el suministro de gas natural como resultado del desarrollo de nuevas tecnologías de producción, pero no está claro cuánto tiempo durará el aplazamiento dada la (presumiblemente) baja EROEI de estas técnicas de producción y el hecho que los mejores depósitos no convencionales como las pizarras Barnett de Texas se estén explotando primero. La producción europea de gas está disminuyendo y la dependencia de Europa del gas ruso está aumentando –pero es difícil decir durante cuánto tiempo Rusia puede mantener las actuales tasas de flujo-.

En resumen, aunque el gas natural tiene un menor impacto medioambiental que los otros combustibles fósiles, especialmente el carbón, su futuro está ensombrecido por temas de suministro y disminución de la EROEI.

4. HIDROELÉCTRICA

La energía hidroeléctrica es la corriente eléctrica producida a partir de la energía cinética del agua en movimiento. La energía gravitacional del agua se captura con relativa facilidad, y se almacena con relativa facilidad tras una presa. Los proyectos hidroeléctricos pueden ser de una escala enorme (como en la presa de las Tres Gargantas en China) o muy pequeña (“microhidroeléctricas”). Los grandes proyectos normalmente suponen una presa, un embalse, túneles y turbinas; los proyectos a pequeña escala normalmente emplean simplemente el “correr del río”, aprovechando la energía del flujo natural del río, sin almacenamiento de agua. La energía hidroeléctrica actualmente proporciona 2.894 teravatio hora (TWh) de electricidad anualmente en todo el mundo, y alrededor de 264 TWh en los EEUU; de toda la energía *eléctrica*, la hidroeléctrica proporciona un 19 por ciento a nivel mundial (con un 15 por ciento procedente de grandes presas), y un 6,5 por ciento en los EEUU. Esto representa un 6 por ciento del total de energía mundial y un 3 por ciento en el país. [31]

A FAVOR: A diferencia de las fuentes de energía fósiles, con las hidroeléctricas las mayores inversiones energéticas y financieras se realizan durante el proyecto de construcción, mientras se necesita muy poco para el mantenimiento y la gestión. Por tanto, la electricidad de las hidroeléctricas es generalmente más barata que la de otras fuentes, cuya generación puede costar dos o tres veces más.

EN CONTRA: Los analistas de energía y los ecologistas están divididos acerca del impacto medioambiental de las hidroeléctricas. Los partidarios de las hidroeléctricas las ven como una fuente de energía limpia y renovable con un moderado impacto medioambiental o social. Los detractores las ven con algo que tiene un impacto medioambiental tan grande, o incluso mayor, que el de algunos combustibles fósiles convencionales. El impacto global incluye las emisiones de carbono principalmente durante la construcción de la presa y el embalse y las liberaciones de metano procedentes de la vegetación inundada. El impacto regional es resultado de la creación del embalse, la construcción de la presa, los cambios en la calidad del agua, y la destrucción del hábitat nativo. La cantidad de emisiones de carbono producida es muy específica del lugar y sustancialmente menor que la de las fuentes de combustible fósiles. Gran parte del debate acerca de las hidroeléctricas se centra en sus efectos sobre la sociedad, y si un suministro constante de agua para producir energía, irrigar o beber justifica la exigencia ocasional de realojar a millones de personas. En conjunto, los proyectos de construcción de grandes presas y embalses han exigido la reubicación de entre 40 y 80 millones de personas durante el último siglo. La ruptura o el hundimiento de la presa es también un riesgo en algunos casos, especialmente en China.

EROEI: La EROEI de las hidroeléctricas se encuentra aproximadamente entre 11,2:1 y 267:1, variando enormemente según el sitio. Dado que las hidroeléctricas son un recurso tan variable, usado en condiciones geográficas muy diferentes e implicando técnicas diversas, no se puede dar una ratio de EROEI para todos los proyectos. La EROEI para los sitios favorables o incluso moderados puede ser extremadamente alta, incluso aunque los impactos medioambiental y social sean graves.

PERSPECTIVAS: A nivel mundial, hay muchos sitios en los que instalar una presa que no se han aprovechado, con potencial hidroeléctrico, aunque en los EEUU son ya pocos porque la mayor parte de los mejores sitios ya se han desarrollado. En teoría, la energía hidroeléctrica se puede instalar en un nivel u otro en cualquier población que esté cerca de un suministro constante de agua en movimiento.

La Asociación Internacional de la Energía Hidroeléctrica estima que alrededor de un tercio de los sitios en los que instalar una planta hidroeléctrica de forma realista ya han sido utilizados. En la práctica, el bajo coste de inversión directa de los combustibles fósiles, combinado con las consecuencias medioambientales y sociales de las presas, ha implicado que los proyectos con combustibles fósiles sean mucho más comunes.

Las presas tienen el potencial para producir una moderada cantidad adicional de electricidad de alta calidad en los países menos industrializados, pero continúa estando asociada a costes medioambientales y sociales extremadamente altos. Muchos autores ven la energía hidroeléctrica del “río que corre” (en la que no se construyen presas) como la alternativa futura, porque se deshace de la necesidad de proyectos de reubicación masivos, minimiza el impacto sobre los peces y la naturaleza salvaje y no libera gases de efecto invernadero (porque generalmente no hay un embalse), mientras conserva los beneficios de una fuente de energía limpia, renovable y barata. Sin embargo, la relativamente baja densidad energética de este enfoque limita su potencial.

5. NUCLEAR

La electricidad procedente de reacciones de fisión nuclear controladas hace mucho tiempo que es una fuente de energía muy polémica. Actualmente hay 439 reactores comerciales en funcionamiento en todo el mundo, 104 de ellos en los EEUU. Produjeron colectivamente 2.658 TWh en todo el mundo en 2006, y 806 TWh en los EEUU. Esto representa alrededor de un 6 por ciento de la energía mundial, un 8 por ciento de toda la energía consumida en los EEUU, y un 19 por ciento de la electricidad en los

EEUU.[32]

Todos los reactores comerciales en los EEUU son variantes de reactores de agua ligera. Otros diseños continúan siendo objeto de investigación.

A FAVOR: La electricidad nuclear es fiable y relativamente barata (con una media de coste de generación de 2,9 centavos por Kw/h) una vez el reactor está construido y en funcionamiento. En los EEUU, aunque no se han construido nuevas plantas nucleares desde hace muchos años, la cantidad de electricidad nuclear proporcionada ha crecido durante la pasada década debido al incremento de la eficiencia y fiabilidad de los reactores existentes.

El ciclo nuclear emite mucho menos CO₂ que quemar carbón para producir una cantidad de energía equivalente (aunque es importante añadir que la minería y el enriquecimiento del uranio, y la construcción de las plantas, implican considerables emisiones de carbono). Esta tasa reducida de emisión de carbono ha llevado a algunos portavoces de la protección del clima a defender la energía nuclear, al menos como un puente temporal a un futuro energético “completamente renovable”.

EN CONTRA: El uranio, el combustible para el ciclo nuclear *no* es un recurso renovable. El pico de la producción de uranio mundial es probable que se produzca entre 2040 y 2050[33], lo que significa que el combustible nuclear será más escaso y caro en las próximas décadas. Ahora ya, el grado medio de mineral de uranio obtenido en las minas ha disminuido sustancialmente en los últimos años a medida que las mejores reservas han sido agotadas. El reciclado del combustible y el empleo de combustibles nucleares alternativos son posibles, pero la tecnología necesaria no ha sido desarrollada adecuadamente.

Construir plantas nucleares es extremadamente costoso. Tanto, que las plantas nucleares que no reciben subsidios no son económicamente competitivas con respecto a plantas similares de combustible fósil. Los subsidios del gobierno en los EEUU incluyen: (1) los de la industria militar nuclear, (2) los subsidios gubernamentales no militares y (3) los costos de seguro artificialmente bajos. Construir nuevas plantas nucleares normalmente implica muchos años de retraso para diseñar, financiar, obtener permisos y construir. El ciclo del combustible nuclear también produce un importante impacto medioambiental, que puede ser incluso mayor durante las fases de minería y procesado que durante el funcionamiento de la planta, aunque se tengan en cuenta los accidentes de liberación de radiación. La minería supone la eliminación del ecosistema, la liberación de polvo, la producción de grandes cantidades de desechos (equivalentes a de 100 a 1000 veces la cantidad de uranio extraída), y el filtrado de partículas emisoras de radiación en las aguas subterráneas. Durante el funcionamiento de la planta, accidentes que causen pequeñas o grandes liberaciones de radiación pueden tener un impacto en el medioambiente local o en áreas geográficas mucho más grandes, haciendo que la tierra sea potencialmente inhabitable (como ocurrió con la explosión y fuga de radiación en el reactor de Chernóbil en la antigua Unión Soviética en 1986).

El almacenamiento de residuos radioactivos es también muy problemático.

Los residuos de alto nivel (como el combustible gastado) es mucho más radioactivo y difícil de tratar que los residuos de bajo nivel, y deben almacenarse in situ durante varios años antes de ser transferidos a un depósito geológico.

Hasta ahora, la forma más conocida de gestionar los residuos, que contienen dosis de radiación letales durante miles de años, es almacenarlos en un depósito geológico, profundamente bajo tierra. El

propuesto desde hace mucho tiempo en Yucca Mountain en Nevada, el único sitio que ha sido investigado como depósito en los EEUU, ha sido recientemente cancelado. Incluso si el depósito de Yucca Mountain hubiese seguido adelante, no hubiera sido suficiente para almacenar los residuos de los EEUU que ya están esperando un almacenamiento permanente. Será necesario encontrar pronto más sitios como candidatos a depósito si el uso de la energía nuclear va a extenderse en los EEUU. Incluso en el caso de sitios ideales, en un plazo de miles de años los residuos pueden filtrarse al agua de mesa. El tema es controvertido incluso tras extremadamente caros y extensos análisis por parte del Departamento de Energía.

Casi todos los reactores comerciales usan agua como refrigerante. Cuando el agua enfría el reactor, esta agua se calienta. Cuando el agua caliente es entonces vertida de vuelta a los lagos, ríos u océanos la contaminación por calor resultante puede perturbar los hábitats acuáticos. Durante la ola de calor en Francia en 2003, varias plantas nucleares tuvieron que cerrar porque el agua del río estaba demasiado caliente. Y en los últimos años, unos cuantos reactores han tenido que ser cerrados debido a restricciones de agua, subrayando una futura vulnerabilidad de esta tecnología en un mundo en el que la sobreexplotación del agua y las extremas sequías debidas al cambio climático se están haciendo cada vez más comunes.

Los reactores no deben situarse en regiones susceptibles de sufrir terremotos debido a la posibilidad de liberación de radiación catastrófica en caso de un terremoto serio. Los reactores nucleares se citan a menudo como objetivos potenciales para terroristas y como fuentes potenciales de materiales radioactivos para la producción de “bombas sucias” terroristas.

EROEI: Un informe de Charles Hall *et al.* [34] de estudios de energía neta de plantas nucleares que han sido publicados hasta la fecha encontró que la información era “idiosincrática, con prejuicios y pobremente documentada.” El problema principal es determinar cuáles deberían ser los límites apropiados del análisis. El informe concluyó que la información más fiable sobre EROEI es bastante vieja (mostrando resultados en el rango de 5 a 8:1), mientras la información más nueva es o muy optimista (15:1 o más) o muy pesimista (baja, incluso menos que 1:1). Un estudio temprano citado por Hall indicaba que los altos *inputs* de energía durante la fase de construcción son una de las principales razones para la baja EROEI –lo que también implica que hay importantes emisiones de gases de efecto invernadero durante la construcción-.

PERSPECTIVAS: La industria nuclear está lista para crecer, con entre diez y veinte nuevas plantas nucleares en consideración solo en los EEUU. Pero la escala de crecimiento es probable que esté limitada principalmente por las razones explicadas arriba.

La esperanza de un desarrollo a gran escala de nuevas plantas nucleares confía en el desarrollo de nuevas tecnologías: reactores modulares de lecho de bolas [*pebble bed*], reciclaje de combustible y el uso del torio como combustible. El máximo avance tecnológico para la energía nuclear sería el desarrollo de un reactor comercial de fusión. Sin embargo, todas estas nuevas tecnologías son problemáticas por una u otra razón. La fusión está a décadas y exigirá mucha investigación muy costosa. La tecnología para extraer energía útil del torio es muy prometedora, pero exigirá muchos años y una cara investigación y desarrollo para comercializarse.

Los únicos reactores reproductores [*breeders*] en existencia están o cerrados, o lo estarán pronto, abandonados, o esperando su reapertura tras serios accidentes. Ejemplos de *breeders* problemáticos son el BN-600 (en Rusia, que terminará su vida en 2010); el reactor *breeder* Clinch River (en los EEUU, construcción abandonada en 1982 porque los EEUU pararon su programa de reprocesamiento del

combustible gastado haciendo así a los *breeders* inútiles); Monju (en Japón, puesto de nuevo en funcionamiento tras una seria filtración de sodio e incendio en 1995); y Superphenix (en Francia, cerrado en 1998). Por tanto, siendo realistas, las plantas nucleares construidas a corto y medio plazo pueden ser solo diferentes incrementalmente respecto a los diseños actuales.

Para que la industria nuclear creciese lo suficiente como para reemplazar una parte significativa de la energía actualmente obtenida de los combustibles fósiles, serían necesarias decenas si no cientos de nuevas plantas, y pronto. Dado el gasto, el tiempo de elaboración implicado en la construcción de la planta, y los temas de seguridad, la industria puede tener éxito simplemente en construir nuevas plantas que reemplacen a las antiguas que están cerca de su jubilación y retirada del servicio.

Hall *et al.* terminan su informe sobre la energía nuclear diciendo: “En nuestra opinión, necesitamos una serie de análisis de muy alto nivel para revisar todos estos temas. Incluso si se hace, parece extremadamente probable que se mantendrán opiniones muy firmes, tanto positivas como negativas. Puede que no haya una resolución a la cuestión nuclear que sea políticamente viable”.

6. BIOMASA

Formada por madera y otros tipos de materiales procedentes de las plantas, así como el estiércol animal, diversos tipos de biomasa proporcionan anualmente alrededor de un 13 por ciento del consumo de energía total mundial y son usadas por más de 3 mil millones de personas para cocinar y para calefacción.[35] (Nota: la mayor parte de los recuentos oficiales de energía procedentes de diversas fuentes, como los de la IEA y la EIA omiten la contribución del uso “tradicional” o no comercial de la biomasa. Dado que estas fuentes oficiales se citarán repetidamente a partir de ahora, el lector atento verá que sumar la contribución de un 13 por ciento de biomasa a las cifras porcentuales de otras fuentes de energía da un total mayor del 100 por ciento. El único remedio para esto en el presente texto hubiera sido recalcular las estadísticas de las fuentes oficiales, pero eso simplemente hubiera añadido una fuente potencial de confusión diferente.) Las “nuevas” formas no tradicionales de uso de biomasa generalmente implican la conversión de madera, cultivos, estiércol, o productos “de desecho” agrícolas en combustible líquido o gaseoso (véase etanol y biodiesel, debajo), usándolo para generar electricidad, o usándolo para cogenerar calor y electricidad. La generación eléctrica mundial procedente de la biomasa fue de alrededor de 183 TWh en 2005 de una capacidad instalada de 40 GW, con un 27 por ciento procedente de biogás y residuos sólidos municipales.[36]

Los combustibles procedentes de la madera actualmente suponen el 60 por ciento de la producción mundial forestal (la mayor parte del 40 por ciento restante se usa para material de construcción y papel) y, junto a los residuos agrícolas (como la paja), contribuye con 220 GWh para cocinar y calefacción. Los bosques son un recurso renovable inmenso, pero se está produciendo una deforestación neta en todo el mundo, especialmente en Sudamérica, Indonesia y África.[37] La deforestación está causada principalmente por la tala comercial y el desbroce de tierras para agricultura a gran escala, *no* por la recogida tradicional de madera, que a menudo se practica de forma sostenible. Sin embargo, en muchas áreas el uso de la madera y la presión de la población llevan a la deforestación e incluso a la desertificación.

La cogeneración o las plantas combinadas de calor y energía (CCE) pueden quemar combustibles fósiles o biomasa para hacer electricidad y están configuradas de forma que el calor de este proceso no sea desperdiciado sino que sea utilizado para calentar espacios o agua. La biomasa CCE es más eficiente produciendo calor que electricidad, pero puede ser práctica en ambos ámbitos si hay una fuente local de exceso de biomasa y una comunidad o demanda industrial cercana de calor y electricidad. Se están construyendo plantas de biomasa en los EEUU, en el norte de Europa y también

en Brasil (donde están asociadas a la industria de procesamiento de azúcar). La tasa de crecimiento de la energía bio ha sido de un 5 por ciento por año en la última década.[38] Las plantas de biomasa son solo la mitad de eficientes que las plantas de gas natural y están limitadas en tamaño por un *fuelshed* de unas 100 millas, pero proporcionan trabajos rurales y una carga de base de energía fiable (aunque en los climas templados la disponibilidad de biomasa es estacional, y el almacenamiento de biomasa es particularmente ineficiente, con altas tasas de pérdida).[39]

Las tecnologías de conversión de biomasa (opuestas a su uso directo quemándola) se pueden dividir en tres categorías. Los métodos *bioquímicos* usan la fermentación y la descomposición para crear alcoholes (principalmente etanol) y gas de vertedero. El aceite extraído de plantas, animales o algas se puede convertir *químicamente* en biodiesel. En los procesos *termoquímicos*, la biomasa es calentada (pirolizada) y descompuesta en carbón y gases de síntesis o bioaceite (dependiendo de la velocidad y la temperatura de la pirolisis y la materia prima). El bioaceite se puede usar como combustible o puede ser refinado en biodiesel, mientras el gas de síntesis tiene propiedades similares al gas natural. Hay un creciente interés por usar los procesos termoquímicos para hacer biocombustibles puesto que el carbón sobrante (llamado biochar) puede ser añadido a los campos de las granjas para mejorar la fertilidad del suelo y secuestrar carbono.[40]

El proceso bioquímico de descomposición en ausencia de oxígeno produce biogás, algo que ocurre de forma natural en lugares en los que la descomposición anaeróbica se concentra, como en pantanos, vertederos o los sistemas digestivos de las vacas. La manufactura industrial del biogás usa bacterias para fermentar o digerir de forma anaeróbica material biodegradable, produciendo una mezcla de combustible que consiste de un 50 a 75 por ciento de metano más otros gases.[41] El biogás se puede utilizar como gas natural y ser quemado como combustible en algo que vaya desde una pequeña cocina económica a una planta de electricidad. El biogás a pequeña escala se utiliza en todo el mundo tanto en los hogares como en la industria.

El biogás se puede producir a escala industrial a partir de materiales de desecho, pero es difícil encontrar estimaciones del tamaño posible de este recurso. La Red nacional en Gran Bretaña ha sugerido que el metano de residuos se puede recoger, limpiar y añadir al sistema de gaseoductos de gas natural existente. Esta agencia estima que si todos los biodesperdicios de aguas residuales, alimentación, agricultura e industria del país se utilizasen, la mitad de todas las necesidades residenciales de gas se podrían cubrir. Quemar biogás para calefacción y cocina ofrece una eficiencia de conversión de energía de un 90 por ciento, mientras el uso de biogás para generar electricidad tiene solo una eficiencia de un 30 por ciento.[42]

A FAVOR: La biomasa está distribuida ampliamente donde vive la población. Esto hace que sea conveniente para el uso en pequeña escala, en aplicaciones a nivel regional en las que el uso de biomasa local sea sostenible. En Europa ha habido un crecimiento continuado en plantas de biomasa de CCE en las que se queman materiales de desecho del procesamiento de madera o de la agricultura, mientras que en los países en vías de desarrollo las plantas CCE funcionan a menudo con cáscaras de arroz o de coco. En California, las granjas lecheras usan metano procedente del estiércol de vaca para funcionar. El biogás se utiliza extensivamente en China para la industria, y 25 millones de hogares en todo el mundo usan biogás para cocinar y para iluminación.[43]

Quemar biomasa y biogás se considera que es neutral respecto al carbono puesto que a diferencia de los combustibles fósiles operan dentro del ciclo de carbono de la biosfera. La biomasa contiene carbono que sería liberado naturalmente por descomposición o quemado en la atmósfera en un corto periodo de tiempo. Usar fuentes de desecho de biogás como estiércol de vaca o gas de vertedero reduce las

emisiones de metano, un gas de efecto invernadero veintitrés veces más potente que el dióxido de carbono.

EN CONTRA: La biomasa es un recurso renovable pero no uno particularmente ampliable. A menudo, la biomasa disponible es un producto de desecho de otras actividades humanas, como residuos de cosechas de la agricultura, virutas de madera, serrín y licor negro de industrias madereras, y residuos sólidos de basura municipal y aguas negras. En un sistema agrícola con menor uso de energía, como puede ser necesario mundialmente en el futuro, los residuos de cosecha pueden ser necesarios para reponer la fertilidad del suelo y ya no se podrán utilizar para generación eléctrica. También podría haber más competencia por los productos de desecho en el futuro a medida que se incremente la fabricación a partir de materiales reciclados.

Usar biomasa para cocinar ha contribuido a la deforestación en muchas partes del mundo y está asociado a una pobre salud y una corta esperanza de vida, especialmente para las mujeres que cocinan con madera o carbón vegetal en espacios mal ventilados. Encontrar un combustible sustituto o incrementar la eficiencia en el proceso de cocinado mediante madera es el objetivo de programas en la India, China y África.[\[44\]](#) Para reducir las emisiones de gas de efecto invernadero, es probablemente más deseable reforestar que usar madera como combustible.

EROEI: Las estimaciones de retorno de energía para la biomasa son extremadamente variables. La biomasa generalmente es utilizada con más eficiencia para calentar que para producir electricidad, pero la generación de electricidad a partir de biomasa puede ser energéticamente favorable en algunos casos. El biogás está hecho normalmente de materiales de desecho y utiliza la descomposición, que es un proceso con un *input* de energía bajo, así que es intrínsecamente eficiente. Respecto a la EROEI del etanol y el biodiesel, ver más abajo.

PERSPECTIVAS: La madera, el carbón vegetal y los residuos agrícolas casi con toda certeza continuarán siendo utilizados en todo el mundo para cocinar y para calefacción. Hay una cantidad decreciente de materiales obtenidos de biomasa que entran en la corriente de desperdicios a causa de un aumento del reciclaje y por tanto la perspectiva de una expansión de la captura de metano de vertedero está disminuyendo. El uso de otras clases de biogases es un área con potencial de crecimiento. Hay políticas de apoyo a la expansión del biogás en la India y especialmente en China, donde existe el objetivo de incrementar el número de digestores de biogás a escala de hogar de una estimación de 1 millón en 2006 a 45 millones en 2020.

7. ENERGÍA EÓLICA

Una de las fuentes de energía de más rápido crecimiento en el mundo, la generación de energía eólica se ha multiplicado por cinco entre 2000 y 2007. Sin embargo, sigue siendo menos de un uno por ciento de la generación de electricidad mundial, y mucho menos de un uno por ciento de la energía total. En los EEUU, la producción actualmente asciende a 32 TWh, que es un 0,77 por ciento del total de energía suministrada, o un 0,4 por ciento de energía total.

De toda la nueva capacidad de generación de electricidad instalada en los EEUU durante 2007 (más de 5200 MW), más del 35 por ciento vino del viento. La producción de energía eólica de los EEUU se ha doblado en solo dos años. En septiembre de 2008, los EEUU sobrepasaron a Alemania como líder mundial en la producción de energía eólica, con más de 25.000 MW de capacidad de generación.[\[45\]](#) (Nota: al hablar de energía eólica es importante distinguir entre capacidad de producción según la placa de identificación –la cantidad de energía que podría teóricamente ser generada a plena capacidad- y la energía real producida: el primer número es siempre mucho mayor, porque los vientos son

intermitentes y variables.)

La tecnología de turbina eólica ha avanzado en los últimos años, con la instalación de mayores turbinas creciendo de 1 MW en 1999 hasta más de 5 MW hoy. Los países que lideran actualmente en capacidad de generación eólica instalada son los Estados Unidos, Alemania, España, India y China. La energía eólica representa actualmente alrededor de un 19 por ciento de la electricidad producida en Dinamarca, un 9 por ciento en España y Portugal y un 6 por ciento en Alemania y la República de Irlanda. En 2007-2008 la eólica llegó a ser la fuente de energía de más rápido crecimiento en Europa, tanto en términos cuantitativos como en porcentaje.

A FAVOR: La energía eólica es una fuente renovable de energía, y hay un potencial enorme para el crecimiento de generación eólica: se ha estimado que desarrollar un 20 por ciento de los sitios con viento abundante produciría siete veces la demanda mundial actual de electricidad.[\[46\]](#) El coste de la electricidad procedente de la energía eólica, que es relativamente bajo, ha ido disminuyendo cada vez más en los últimos años. En los EEUU, en 2006, el coste por unidad de capacidad de producción de energía se estimaba comparable al coste de las nuevas capacidades de generación del carbón y el gas natural: el coste eólico se estimaba en 55,80\$ por MWh, el carbón en 53,10\$/MWh, y el gas natural en 52,50\$ (sin embargo, una vez más es importante en la energía eólica diferenciar entre la capacidad de producción según la placa de identificación y la energía real producida).[\[47\]](#)

EN CONTRA: La naturaleza intermitente, incontrolada, del viento reduce su valor cuando se compara con fuentes de energía controladas por el operador como el carbón, el gas o la energía nuclear. Por ejemplo, durante enero de 2009 un sistema de altas presiones sobre Gran Bretaña dio como resultado bajas velocidades del viento combinadas con temperaturas inusualmente bajas (y por tanto una demanda de electricidad más alta de lo normal). La única forma para que los operadores se preparen ante una situación así es construir una capacidad de generación extra procedente de otras fuentes de energía. Por tanto, añadir nuevas instalaciones de generación eólica a menudo no hace disminuir sustancialmente la necesidad de plantas de carbón, gas o nucleares; simplemente permite que esas plantas convencionales se usen menos mientras sopla el viento. Sin embargo, esto crea la necesidad de sistemas de control de equilibrio de carga en la red. Otro problema importante para la generación eólica es que el recurso base se encuentra a menudo en localizaciones remotas. Llevar la electricidad del punto local de generación a centros de carga potencialmente distantes puede ser costoso. La lejanía de la base del recurso eólico también lleva al incremento de costes para el desarrollo en el caso de tierras con terrenos difíciles o que estén lejos de infraestructuras de transporte.

Extendidas sobre un área importante, las plantas eólicas deben competir con ideas de desarrollo alternativas para estos terrenos, especialmente cuando los usos simultáneos múltiples son imposibles. Las enormes reducciones en el coste en la manufactura de nuevas turbinas eólicas en las pasadas dos décadas puede ralentizarse a medida que la eficiencia se maximice y el coste de los materiales aumente.

Aunque las turbinas eólicas en general han sido aceptadas por la mayor parte de las comunidades, ha habido alguna preocupación por la “contaminación visual” y el peligro de las turbinas para los pájaros. *EROEI:* La EROEI media de todos los estudios a nivel mundial (funcionales y conceptuales) fue de 24,6:1. La EROEI media de estudios sólo funcionales es de 18,1:1. Esto la compara favorablemente con las tecnologías convencionales de generación de energía.[\[48\]](#)

En los EEUU, la energía eólica instalada tiene una alta EROEI (18:1), aunque los problemas con el almacenamiento de electricidad puede reducir esta cifra sustancialmente a medida que la capacidad de generación crece. En general, la EROEI crece con el índice de potencia de la turbina, porque (1) las

turbinas pequeñas representan tecnologías más viejas, menos eficientes; (2) las turbinas grandes tienen un mayor diámetro de rotor y de área de barrido, que es el determinante más importante del potencial de una turbina para generar electricidad; y (3) dado que la energía que puede generar el viento aumenta con el cubo del aumento de la velocidad del viento, y las mayores turbinas pueden extraer energía de vientos a mayores alturas, la velocidad del viento y por tanto la EROEI aumenta rápidamente con la altura de la turbina.

La ratio de energía neta para la energía eólica puede variar ampliamente dependiendo de la localización de la fabricación y la instalación de una turbina, debido a las diferencias en la energía utilizada para el transporte de turbinas fabricadas entre varios países, la estructura económica y energética de los países y las políticas de reciclaje. Por ejemplo, la producción y funcionamiento de una turbina E-40 en la costa de Alemania requiere 1,39 veces más energía que en Brasil. La EROEI para las turbinas colocadas en el mar es probable que sea más baja debido a las necesidades de mantenimiento como resultado de los efectos corrosivos de la espuma del mar.

PERSPECTIVAS: El viento es ya una fuente de energía competitiva. Por razones estructurales (su coste de producción a largo plazo se establece en términos financieros y no varía a corto plazo), el viento se beneficia de *tarifas reguladas [feed-in tariffs]* para protegerlo de las fluctuaciones a corto plazo en el precio de la electricidad. Pero en general será una de las fuentes de energía más baratas a medida que los combustibles fósiles se reduzcan –y con un precio que está garantizado que no crecerá con el tiempo-. En la Unión Europea su penetración está ya alcanzando entre el 10 y el 25 por ciento en varios países; las perspectivas en los EEUU son en cierta medida mejores, puesto que el crecimiento no está limitado por los límites físicos y la densidad de población de Europa (con más tierra cubierta por ciudades, lo que deja menos buenos sitios para turbinas). La intermitencia puede ser gestionada hasta cierto punto, como muestra la experiencia europea, mediante una combinación de gestión inteligente de la red y el uso infrecuente de las instalaciones existentes de combustible fósil. Aunque será necesaria una gran cantidad de capacidad de generación de energía térmica, será necesario quemar menos carbón y gas. Sin embargo, hasta que la energía de los molinos no pueda minar minerales, producir cemento, y hacer acero y aleaciones y las máquinas herramienta para hacer componentes, los costes de las turbinas eólicas van a estar muy conectados a los precios de los combustibles fósiles, y esos costes tendrán un impacto sobre los precios de la energía.

En los EEUU un mayor desarrollo de la energía eólica exigirá una inversión importante para actualizar la red nacional de electricidad.

8. SOLAR FOTOVOLTAICA (FV)

Las células fotovoltaicas (FV) generan electricidad directamente de la luz del sol. Las células FV normalmente usan silicio como material semiconductor. Dado que una cantidad enorme de energía se transmite a la superficie de la Tierra en forma de radiación solar, aprovechar esta fuente tiene un gran potencial. Si se pudiese capturar solamente un 0,025 por ciento de este flujo de energía, sería suficiente para satisfacer la demanda mundial de electricidad.

En 2006 y 2007, los sistemas fotovoltaicos fueron la tecnología energética de más rápido crecimiento en el mundo (en porcentaje), incrementándose un 50 por ciento anualmente. A principios de 2008, la capacidad mundial FV instalada era de 12,4 GW.

Los objetivos de la investigación sobre FV son principalmente (1) incrementar la eficiencia del proceso convirtiendo la luz del sol en electricidad (la eficiencia habitual de un panel solar de silicio monocristal comercial instalado es de un 10 por ciento, lo que significa que solamente un 10 por ciento de la

energía de los rayos de sol se convierte en energía eléctrica, mientras se ha conseguido un 24,7 por ciento de eficiencia en condiciones de laboratorio); y (2) disminuir el coste de producción (los paneles monocristalinos de silicio cuestan una media de 3 dólares por vatio instalado, mientras los nuevos materiales y tecnologías fotovoltaicos, especialmente los materiales FV de película delgada, hechos imprimiendo o pulverizando productos nanoquímicos sobre un sustrato plástico barato, prometen reducir los costes de producción enormemente, aunque normalmente con una pérdida de eficiencia o durabilidad).[49]

A FAVOR: La energía solar capturada por la tecnología fotovoltaica es renovable –y hay muchísima-. La energía media acumulada que irradia un metro cuadrado de la superficie de la Tierra durante un año equivale aproximadamente a la energía de un barril de petróleo; si esta luz solar pudiese ser capturada con un 10 por ciento de eficiencia 3.861 millas cuadradas de filas de FV podrían proporcionar la energía de mil millones de barriles de petróleo. Cubrir las 360.000 millas cuadradas que se estiman de tejados en el mundo con módulos FV generaría la energía de 98 mil millones de barriles de petróleo cada año.

El precio de las nuevas instalaciones generadoras de FV ha ido disminuyendo progresivamente durante muchos años. A diferencia de los sistemas solares pasivos, las células FV pueden funcionar en días nublados.[50]

EN CONTRA: La funcionalidad de la generación eléctrica de FV varía no solo diariamente, sino también estacionalmente según la cobertura de nubes, el ángulo del sol y el número de horas de luz solar. Así, igual que con el viento, la naturaleza incontrolada e intermitente del FV reduce su valor cuando se compara con las fuentes de energía controladas por operador como el carbón, el gas o la energía nuclear.

La luz del sol es abundante pero difusa: su densidad por área es baja. Por tanto, los esfuerzos para capturar energía de la luz solar están sujetos inevitablemente a costes y contraprestaciones al escalar: por ejemplo, las grandes instalaciones solares requieren tierra adecuada, agua para su limpieza periódica, caminos para que accedan los vehículos de mantenimiento, etc. Alguno de los impactos medioambientales de fabricar sistemas FV han sido analizados por Alsema et al. y comparados con los impactos de otras tecnologías energéticas.[51] Este estudio ha descubierto que las emisiones de CO₂ de un sistema de FV son mayores que las de los sistemas eólicos, pero solo un 5 por ciento de las que se producen al quemar carbón. Un impacto potencial sería la pérdida de grandes áreas de hábitats de vida salvaje si se construyesen conjuntos solares a escala industrial en áreas desérticas subdesarrolladas.

EROEI: Los análisis de energía neta de la energía FV son escasos. Sin embargo, usando el “periodo de amortización energética” y el periodo de vida del sistema, es posible determinar una EROEI aproximada. A partir del análisis de un típico ciclo vital realizado en 2005, Hall et al. calculan una EROEI de 3,75:1 a 10:1.[52]

Alguno de estos valores EROEI probablemente cambiarán a medida que la investigación y el desarrollo continúen. Si persisten las condiciones actuales, la EROEI puede disminuir ya que las fuentes de silicio para la industria están limitadas por la capacidad de producción de los fabricantes de semiconductores.

PERSPECTIVAS: A pesar del enorme crecimiento de la energía FV en los últimos años, el crecimiento progresivo de la producción de petróleo, gas o carbón durante un año típico reciente ha excedido toda la producción de energía fotovoltaica existente. Por tanto, si la FV debe convertirse en una fuente de energía primaria, la tasa de incremento de capacidad necesitará ser aún mayor que en la actualidad. A

causa de su alto coste directo, una parte sustancial de la FV instalada se ha distribuido sobre los tejados de los hogares en pueblos muy alejados de la red eléctrica, donde la provisión de fuentes de electricidad convencional serían poco prácticas o prohibitivamente caras. Instalaciones de FV comerciales a gran escala empiezan a aparecer en varios países, en parte debido al bajo precio de los más nuevos materiales de FV de película delgada y a cambios en las políticas gubernamentales.[\[53\]](#)

La crisis económica actual ha disminuido sustancialmente el ritmo de expansión de FV, pero esta situación se puede revertir si los esfuerzos del gobierno para revivir la economía se centrase en la inversión en energías renovables.

Sin embargo, si fuese a producirse un crecimiento muy grande y rápido en la industria FV, debería resolverse el problema de la falta de materiales para evitar aumentos de costes espectaculares. Los materiales en cuestión –cobre, cadmio-telurio (CdTe), y cobre-indio-galio-diseleniuro (CIGS)- son cruciales para algunos de los materiales FV de película delgada a los que a menudo se liga el futuro crecimiento de la industria (basado en la disminución de los costes de producción). Con el tiempo, la producción de FV puede encontrarse limitada por la falta de materiales disponibles, la tasa con la que los materiales pueden ser recuperados o reciclados, o la posibilidad de competencia con otras industrias por estos materiales escasos. Una solución a largo plazo se basaría en el desarrollo de nuevos materiales FV que sean comunes y baratos. La FV de concentración, que usa lentes para enfocar la luz solar sobre pequeñas y altamente eficientes obleas de silicio, está consiguiendo costos cada vez más bajos y una eficiencia cada vez más alta, y podría ser competitivo dentro de pocos años con la generación de energía del carbón, las nucleares y el gas natural sobre la base de capacidad instalada por vatio. Sin embargo, esta tecnología está todavía en su infancia y aunque se pueda desarrollar más, el problema de la intermitencia perdurará.

9. SOLAR TÉRMICA ACTIVA (CONCENTRACIÓN)

Esta tecnología consta normalmente de instalaciones de espejos que enfocan la luz solar, creando temperaturas muy altas que calientan un líquido que hace girar una turbina, produciendo electricidad. La misma tecnología de planta eléctrica que se utiliza con los combustibles fósiles se puede usar con la solar térmica dado que los colectores que enfocan pueden calentar líquidos a temperaturas entre 300°C y 1000°C. El combustible fósil se puede usar como respaldo durante la noche o cuando el brillo del sol es intermitente.

Hay mucho interés e investigación en la solar térmica activa y se está diseñando y construyendo ahora mismo una segunda generación de plantas, la mayoría en España. La capacidad mundial alcanzará pronto los 3GW.

A FAVOR: Como la FV, la solar térmica activa usa una fuente de energía renovable (la luz del sol) y hay un enorme potencial de crecimiento. En las mejores localizaciones, el precio por vatio de capacidad instalada es competitivo con las fuentes energéticas de combustible fósil. La solar térmica se beneficia del uso de tecnología en plantas energéticas ya maduras y necesita menos tierra que un conjunto fotovoltaico con la misma capacidad de generación.

EN CONTRA: De nuevo, como en el caso de la FV, la concentración de energía solar térmica es intermitente y estacional. Cabe esperar algún impacto medioambiental en el área cubierta por los conjuntos de espejos y durante la construcción de líneas de transmisión a áreas básicamente desiertas en las que esta tecnología funciona mejor.

EROEI: El balance energético de esa tecnología es muy variable dependiendo de la localización, y por

tanto se han hecho pocos estudios. En las mejores localizaciones (áreas con muchos días de sol todo el año), la EROEI es probable que sea relativamente alta.

PERSPECTIVAS: Hay un gran potencial para el desarrollo a gran escala de la energía solar térmica de concentración. Algunos analistas han sugerido incluso que todas las necesidades energéticas mundiales se podrían cubrir con energía eléctrica generada por esta tecnología. Esto requeriría cubrir con espejos grandes áreas de desierto en el sudoeste de los EEUU, el norte de África, Asia central y Australia central, así como la construcción de líneas de transmisión de alto voltaje desde estos sitios remotos a lugares en los que la demanda de electricidad es más alta. Un proyecto así, en principio es posible, pero las dificultades logísticas y los coste financieros serían enormes. Además, seguiría habiendo algunos problemas de intermitencia aunque se escogiesen los sitios más soleados.

Dejando de lado estos planes grandiosos, para los países que se encuentran lo suficientemente cerca del ecuador, esta parece ser una de las fuentes de energía alternativas más prometedoras.[\[54\]](#)

Recientemente, un proyecto emprendedor llamado Desertec ha propuesto recaudar unos 570 mil millones para la construcción de una instalación solar térmica activa enorme en el desierto del Sahara para cubrir el 15 por ciento de las necesidades energéticas de Europa. Las plantas solares térmicas de concentración en España están probando ahora un módulo de almacenamiento de calor,[\[55\]](#) que puede mantener el suministro de energía durante las noches y quizá periodos más largos de baja insolación. Dado que la energía térmica es mucho más barata de almacenar que la electricidad, esto podría representar una ventaja sobre la energía eólica o la FV si las pruebas españolas tienen éxito.

10. SOLAR PASIVA

El enfoque más simple consiste en capturar y optimizar el calor natural y la luz del sol dentro de las áreas habitables sin el uso de colectores, bombas, o aparatos mecánicos reduciendo o eliminando así la necesidad de proporcionar calor o iluminación.

Los edificios son responsables de un gran porcentaje del total del uso de la energía en muchos países, y por tanto las tecnologías pasivas solares son capaces de compensar una parte sustancial de la producción y consumo eléctrico que si no fuese por ellas vendría de combustibles fósiles. Un edificio solar pasivo es diseñado (1) para mantener una temperatura media confortable, y (2) para minimizar las fluctuaciones de temperatura. Un edificio así normalmente necesita más tiempo, dinero y esfuerzo en el diseño para su construcción, recuperándose con el tiempo estos costes extra con el ahorro de energía.

El calentamiento solar pasivo toma tres formas dominantes: superficies de vidrio para ayudar a capturar la luz solar; *muros trombe*, y otros elementos para el ahorro de calor; y aislamiento para mantener relativamente constantes las temperaturas. Otros factores importantes son orientar la parte más alargada del edificio hacia el sol, determinar el tamaño apropiado de la masa requerida para mantener y liberar lentamente el calor acumulado tras la puesta de sol y determinar el tamaño del muro trombe necesario para calendar un espacio dado. (Por supuesto, el tamaño del edificio en su totalidad también es importante –un diseño solar pasivo para una casa de tamaño enorme no tiene sentido-) Otros usos pasivos de la luz del sol en los edificios incluyen el refresco solar pasivo y aprovechar la luz del día (usando ventanas y aberturas para hacer uso de la luz natural).

A FAVOR: Dependiendo del estudio, los hogares solar pasivos cuestan menos, lo mismo o hasta un 5 por ciento más que otros hogares. Sin embargo, aún en este último caso el coste extra se amortiza con el ahorro de energía. Un hogar solar pasivo solo puede proporcionar calor a sus ocupantes, no electricidad extra, pero si se usasen en todas las casas nuevas sistemas pasivos, sería un paso adelante hacia el reemplazo de otros combustibles.

Incorporar un sistema solar pasivo en el diseño de una casa nueva es generalmente más barato que intentar incorporarlo en una casa ya existente. Un hogar solar “disminuye las cargas de enfriamiento y reduce el consumo de electricidad, lo que lleva a una disminución significativa del uso de combustibles fósiles”.[\[56\]](#) Los edificios solares pasivos, en contraste con los edificios con iluminación artificial, pueden también proporcionar un ambiente de trabajo más sano, más productivo.

EN CONTRA: Las limitaciones de la calefacción solar pasiva pueden incluir la localización geográfica inapropiada (las nubes y los climas más fríos hacen la calefacción solar menos efectiva), y las relativas dificultades de sellar la casa para reducir las fugas de aire y a la vez no aumentar la oportunidad de que los contaminantes queden atrapados dentro. El lado que captura el calor, encarado al ecuador, necesita una buena exposición solar en invierno, que puede exigir separar más las casas y usar más tierra de la que de otra forma se necesitaría.

EROEI: Hablando con propiedad, no se pueden usar cálculos de EROEI puesto que no hay “salida de energía” en la ecuación. El diseño solar pasivo es esencialmente el uso de la “energía gratis” de la naturaleza para reemplazar otras formas de energía que de otra forma sería necesario utilizar para calefacción e iluminación. Es extremadamente específico para una localización determinada, y los arquitectos raramente obtienen un *feedback* cuantitativo de los sistemas que han diseñado y por tanto determinar las cifras generales de ahorro es difícil (pero un rango de entre el 30 y el 70 por ciento es normal). Si el sistema se construye en la casa desde el principio, los ahorros de energía se pueden obtener con poca o ninguna inversión adicional.

PERSPECTIVAS: Diseñar edificios desde el principio para que tomen ventaja del calor e iluminación naturales, y usar más aislamiento y masa solar, tiene un tremendo potencial para reducir la demanda de energía. Sin embargo, en muchos casos los edificios de alta eficiencia requieren más energía para su construcción, (la energía en la construcción normalmente no se tiene en cuenta en los cálculos de ahorro, que habitualmente solo se hacen sobre la energía de funcionamiento).

Hasta ahora, los costes más altos de construcción han desincentivado el desarrollo a gran escala de los hogares solares pasivos en la mayoría de países. Precios más altos de energía sin duda alterarán gradualmente esta situación, pero se podrían obtener resultados más rápidos mediante cambios en las regulaciones y estándares, como se ha demostrado en Alemania. Allí, el desarrollo del estándar voluntario *Passivhaus* ha estimulado la construcción y la readaptación de más de 20.000 casas pasivas en el norte de Europa.[\[57\]](#) La *Passivhaus* está diseñada para usar muy poca energía para calefacción. La solar pasiva proporciona calor al espacio, y el superaislamiento y el intercambio controlado de aire con el exterior (normalmente con un intercambiador de calor) reducen las pérdidas de calor.

Los edificios en los países industrializados generalmente se han hecho más eficientes en los últimos años. Sin embargo, la disminución de la energía media usada por pie cuadrado ha sido más que superada por el crecimiento de la población y la sobreconstrucción del terreno (el tamaño medio de los edificios ha crecido), de forma que la energía total usada en los edificios ha seguido aumentando. Así, los patrones de crecimiento económico y población deben ser parte de la “agenda verde de construcción”, junto al incremento del uso de los elementos de diseño solar pasivos.[\[58\]](#)

11. ENERGÍA GEOTÉRMICA

Procedente del calor interno de la Tierra, la energía geotérmica se puede “minar” extrayendo agua caliente o vapor para hacer funcionar una turbina que genere electricidad o para utilizar directamente el calor. La energía geotérmica de alta calidad normalmente solo se encuentra disponible en regiones en

las que las placas tectónicas se tocan y las actividades volcánicas y sísmicas son comunes. Se puede obtener calor directo geotérmico de baja temperatura en cualquier sitio de la Tierra cavando unos cuantos metros e instalando un sistema de tuberías conectado a una bomba de calor. Actualmente, los únicos lugares en los que se explota la energía eléctrica geotérmica son aquellos en los que existen recursos hidrotermales en forma de depósitos de agua caliente o vapor. En estas localizaciones, el agua caliente subterránea es bombeada a la superficie mediante pozos de dos a tres km. de profundidad y es utilizada para mover turbinas. Un ejemplo : La instalación Geysers en el norte de California, que ocupa 30 millas cuadradas a lo largo de Sonoma y Lake County, comprende el mayor complejo del mundo de plantas geotérmicas. Las 15 plantas tienen una capacidad total de generación de alrededor de 725 MW de electricidad –suficiente para dar energía a 725.000 hogares, o una ciudad del tamaño de San Francisco-. Los Geysers suplen las necesidades habituales de los condados de Sonoma, Lake y Mendocino, así como una parte de las necesidades energéticas de los condados de Marin y Napa.

También se puede generar energía a partir rocas calientes secas bombeando fluido a las turbinas (esencialmente agua) en ellas a través de pozos de entre tres a diez km. de profundidad. Este método, llamado Sistema Geotérmico Ampliado [*Enhanced Geothermal System*] (EGS), es objeto de mucha investigación, pero no se ha generado comercialmente energía usando EGS. Si se perfeccionase, el EGS podría generar energía geotérmica en muchos más lugares que en aquellos que se practica actualmente.

En 2006, la capacidad energética geotérmica fue de unos 10 GW.[\[59\]](#) El crecimiento anual de generación de energía geotérmica a nivel mundial se ha ralentizado del 9 por ciento en 1997 a 2,5 por ciento en 2007.

Sin embargo, el uso de calor directo usando bombas de calor o agua caliente conducida por tuberías ha ido creciendo un 30 a 40 por ciento anualmente, especialmente en Europa, Asia y Canadá.[\[60\]](#) (Es esta una tecnología diferente en esencia de la producción geotérmica de electricidad, aunque el recurso básico –el calor de la Tierra- sea el mismo.)

A FAVOR: Las plantas geotérmicas producen niveles mucho más bajos de emisiones de carbono y utilizan menos terreno que las plantas de combustible fósil. También pueden funcionar constantemente, a diferencia de otros sistemas energéticos renovables, como el eólico y el solar.

El calor geotérmico directo se puede usar en todas partes (y las bombas de calor geotérmicas están entre las pocas opciones no fósiles para calentar espacios), aunque es menos efectiva por coste en los climas templados.

Los países ricos en recursos geotérmicos (Sudán, Etiopía, Colombia, Ecuador, buena parte del Caribe y muchas islas del Pacífico) podrían ser menos dependientes de la energía foránea.

EN CONTRA: Además de la geografía y la tecnología, el alto coste en capital y los bajos precios de los combustibles fósiles son los principales factores que limitan en desarrollo de la producción de electricidad geotérmica. Las mejoras tecnológicas (especialmente un mayor desarrollo de EGS) son necesarias para que la industria continúe creciendo. El agua también puede ser un factor limitador puesto que los dos sistemas, el hidrotermal y el de sistemas de roca seca consumen agua.

La sustentabilidad de los sistemas de generación eléctrica geotermal es motivo de preocupación. Los recursos geotérmicos se renuevan únicamente si la recuperación de calor se compensa con el reabastecimiento natural de la fuente de calor.

Algunas plantas geotérmicas han asistido a una disminución de la temperatura, probablemente porque

la planta estaba sobredimensionada para la fuente de calor local.

Es probable que haya alguna contaminación aérea, acuática, térmica y acústica al construir y operar una planta geotérmica así como alguna acumulación de residuos y la posibilidad de actividad sísmica inducida cerca de ella.

EROEI: La energía neta calculada en la generación eléctrica hidrotermal varía, dependiendo del investigador, entre 2:1 y 13:1. La discrepancia refleja diferencias en eficiencia debido a las características del sitio y la falta de una metodología unificada para los análisis de EROEI, así como a los desacuerdos acerca de los límites del sistema, la corrección de calidad y las futuras expectativas. [\[61\]](#)

No hay cálculos de valores de EROEI para el uso directo del calor geotérmico, aunque por varias razones se puede asumir que son mayores que las de generación eléctrica hidrotermal.

Como punto de arranque, se ha calculado que las bombas de calor mueven de tres a cinco veces la energía en calor que la que consumen en electricidad.

PERSPECTIVAS: No hay consenso sobre las estimaciones de la base potencial de recursos para la generación de energía geotérmica. Las áreas hidrotermales que tienen tanto calor como agua son raras, así que la expansión a gran escala de la energía geotérmica depende de si la EGS y otras tecnologías en desarrollo llegarán a probar ser comercialmente viables. Un informe del MIT de 2006 estimó los recursos hidrotérmicos de los EEUU entre 2.400 y 9.600 EJ, mientras los recursos geotérmicos de calor seco se estimaron en 13 millones de EJ. [\[62\]](#)

Hasta que la EGS se desarrolle y se aplique, los recursos hidrotermales limitados continuarán siendo importantes regionalmente.

Mientras tanto, el uso de calor directo geotérmico mediante bombas de calor proporciona una de las pocas alternativas disponibles al uso de los combustibles fósiles o a la madera para calentar las zonas habitables, y es probable por tanto que vea una mayor tasa de aplicación en los climas fríos.

12. ENERGÍA DE LOS DESPERDICIOS

La basura puede ser quemada para proporcionar energía y el metano puede ser capturado en los vertederos. Teniéndolo todo en cuenta, el mundo obtiene más de 100 TWh de electricidad, e incluso una cantidad mayor de energía calorífica útil a partir de los desechos, suponiendo alrededor de un 1 por ciento de toda la energía utilizada mundialmente.

En los EEUU, 87 plantas incineradoras producen alrededor de 12,3 TWh de electricidad por año. Los desechos municipales también se queman en Europa para producir electricidad; Taiwán, Singapur y Japón incineran entre el 50 y el 80 por ciento de sus desechos. Hay 600 plantas de incineración produciendo energía en todo el mundo. Sin embargo, la práctica está básicamente restringida a los países de altos ingresos porque el funcionamiento de tales plantas es caro y el flujo de desechos en los países con bajos ingresos normalmente tiene un valor calorífico bajo. Una estimación del total de energía producida es de 450 TWh, pero esto incluye tanto la energía calorífica como la electricidad. [\[63\]](#) La captura de gas de vertedero produce 11 TWh de electricidad y 77 mil millones de pies cúbicos de gas para uso directo anualmente en los EEUU (de 340 de un total de 2.975 vertederos). [\[64\]](#) En Europa, el gas de vertedero proporciona 17 TWh de electricidad así como energía calorífica, para un total de 36,3 TWh de energía de biogás; allí, la recuperación de gas es ahora obligatoria.

A FAVOR: Los productos de desecho industriales contienen energía; por tanto, los esfuerzos para recuperar esa energía pueden ser pensados como una forma de conseguir mayor eficiencia en la totalidad del sistema industrial. La producción de energía a partir de los desechos no implica la extracción de más recursos naturales que los que ya se han utilizado en las actividades que generaron los desechos (otros que los recursos utilizados para construir y hacer funcionar las plantas de creación de energía a partir de los desechos en sí).

EN CONTRA: La incineración de basura libera al medio ambiente cualquier elemento tóxico que se encuentre en los productos de desecho que se están quemando –incluyendo dioxinas, uno de los componentes más letales que se conocen-. Además, las incineradoras emiten más CO₂ por unidad de energía producida que las plantas de generación de energía que queman carbón, gas natural, o petróleo.

Si el objetivo es la eficiencia energética, una mejor solución sistémica para tratar los desechos sería minimizar el flujo de basura. Además, un enfoque de cero basura es una de las estrategias más rápidas, más baratas y más efectivas para proteger el clima y el medio ambiente: disminuir significativamente los desechos que se envían a vertederos e incineradoras podría reducir los gases de efecto invernadero en una cantidad equivalente al cierre de una quinta parte de las plantas de carbón en los EEUU. Sin embargo, si la actividad económica continua disminuyendo, como resultado de un crecimiento económico más lento se producirán menos desechos, uno de los aspectos positivos que se pueden ver en el declive financiero.

EROEI: Hay poca información disponible sobre la energía neta procedente de la incineración de residuos o en la captura de gas de vertedero. Si los límites del sistema son muy estrechos (de forma que únicamente se incluyan los costes energéticos directos), la EROEI de la captura de gas de vertedero es probable que sea alta. La EROEI de la incineración de basura es probable que disminuya a medida que se dedique más inversión a la prevención de la liberación de materiales tóxicos en los quemadores.

PERSPECTIVAS: Si y cuando se apliquen de forma más general políticas de cero-residuos, la cantidad de desechos disponibles para ser quemados o enviados a vertederos disminuirá espectacularmente. Por tanto, los proyectos de energía de los desechos no deberían ser vistos como sostenibles a largo plazo, ni debería ser vista esta fuente de energía como algo escalable –esto es, es improbable que se incremente espectacularmente su volumen-.

13. ETANOL

El etanol es un alcohol hecho de material vegetal –normalmente caña de azúcar o maíz- que se descompone en azúcares que después son fermentados. Su uso como combustible para el transporte ha tenido una larga historia, que comienza con el modelo Ford T. En 2007, se produjeron en todo el mundo 13,1 mil millones de galones de etanol. El 38 por ciento fue producido a partir de caña de azúcar en Brasil, y el 50 por ciento a partir de maíz en los EEUU.[\[65\]](#) Ha habido un alto ritmo de crecimiento en la industria, de un 15 por ciento anual en la producción mundial entre 2000 y 2006. El etanol puede sustituir la gasolina, pero la cantidad total producida sigue siendo una pequeña parte de los 142 billones de galones de gasolina consumidos en los EEUU cada año.[\[66\]](#)

El etanol se puede mezclar con gasolina en concentraciones de hasta el 10 por ciento para ser usado en los coches actualmente existentes. Para porcentajes mayores se necesitan modificaciones en los motores puesto que el etanol es más corrosivo que la gasolina. Ya se fabrican nuevos coches que funcionan con un 100 por ciento de etanol, en la mezcla 25/75 etanol/gasolina ‘gasohol’ que se usa en Brasil, o la mezcla 85/15 (“E85”) que se encuentra en los EEUU. El etanol de maíz se ha convertido en

algo muy controvertido a causa de los problemas asociados con el uso de plantas de consumo alimentario como el maíz para combustible, y el desvío de grandes cantidades de tierra de la producción de alimento a la de combustible. Otro problema es que las plantas de etanol en sí mismas utilizan combustibles fósiles.[67] Sin embargo, hay ahora un creciente interés en hacer etanol a partir de vegetales que no sean alimento como el forraje de maíz, paja de trigo o pinos. Una materia prima potencial es el pasto varilla, una planta nativa de las praderas, que requiere menos combustible fósil para su cultivo que el maíz. Sin embargo, hacer etanol celulósico a partir de estas materias primas no comestibles es una tecnología en su infancia y todavía no comercializada.

Los recursos potenciales del etanol están limitados por la cantidad de tierra disponible para hacer crecer la materia prima. De acuerdo con la Unión de Científicos Preocupados [*Union of Concerned Scientists* (UCS)], usar todo el maíz producido en los EEUU sin dejar nada para alimentación humana o animal reemplazaría alrededor del 15 por ciento de la demanda de gasolina en 2025.[68] La producción a gran escala de pasto varilla u otro nuevo cultivo de celulosa requeriría encontrar muchísimos acres de tierra en los que cultivarlos, agravando también la carestía de tierras agrícolas.

A FAVOR: El etanol tiene la portabilidad y la flexibilidad del petróleo y se puede usar en los vehículos ya existentes en pequeñas cantidades mezclado con gasolina. La infraestructura de distribución de gasolina se podría ir cambiando gradualmente a etanol a medida que los nuevos coches que funcionan con mayores concentraciones de etanol se introducen paulatinamente, aunque las actuales tuberías deberían reemplazarse dado que el etanol es altamente corrosivo.

El etanol celulósico es ampliamente considerado una fuente de energía prometedora puesto que potencialmente tiene menos impacto medioambiental con respecto al uso de la tierra y al ciclo de vida de las emisiones de gas de efecto invernadero que los combustibles fósiles.

La UCS informa de que tiene un potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de un 80 a 90 por ciento comparado con la gasolina.[69] Sin embargo, esta conclusión está en discusión, y hay todavía serios problemas técnicos con la producción de etanol celulósico a una escala comercial.

EN CONTRA: Hay aproximadamente 45 MJ por kilogramo tanto en la gasolina como en el petróleo crudo, mientras el etanol tiene una densidad energética de unos 26 MJ por kilogramo y el maíz tiene solamente 16 MJ por kilogramo. En general, esto significa que se deben producir y cosechar grandes cantidades de maíz para igualar incluso una pequeña porción del consumo de gasolina existente según un nivel de energía equivalente, lo que sin duda expandiría la cantidad de tierra que ha sufrido el impacto del proceso de producción de etanol basado en el maíz. El aumento en la producción de etanol de maíz puede haber ayudado a elevar el precio del maíz en todo el mundo en 2007, contribuyendo a elevar un 400 por ciento el precio de las tortillas en México.[70] El etanol y otros biocombustibles consumen hoy en día un 17 por ciento de la producción mundial de grano.

También hay implicaciones climáticas en la producción de etanol de maíz. Si las cosechas de alimentos se usan para hacer combustible para el transporte en lugar de para alimentación, será necesario destinar más tierra para producción de alimentos en algún otro sitio. Cuando se despueblan ecosistemas naturales para la producción de alimentos o etanol, el resultado es una “deuda de carbono” que libera entre 17 y 420 veces más CO₂ del que se ahorra por el reemplazo de combustibles fósiles.[71] La situación es mejor cuando se trata de la tierra destinada actualmente a cultivo, pero no demasiado: dado que se necesitan combustibles fósiles para producir maíz y convertirlo en etanol, el combustible finalizado se considera que da como resultado solo una reducción del 10 al 25 por ciento de emisiones de gases de efecto invernadero si se compara con la gasolina,[72] aunque incluso este nivel de

reducción es cuestionable, puesto que se basa en cálculos que incluyen DDGS; si se consideran únicamente los combustibles líquidos, probablemente hay menos o ninguna reducción de gases de efecto invernadero.

El etanol de maíz usa también entre tres y seis galones de agua por cada galón de etanol producido y se ha demostrado que emite más gases contaminantes que la gasolina.

EROEI: Hay una gama de estimaciones sobre la energía neta de la producción de etanol dado que la EROEI depende de variables de un rango muy amplio, como los *inputs* de energía necesarios para obtener la materia prima (que es alta para el maíz y baja para el pasto varilla y los materiales de desecho de la celulosa) y la naturaleza del proceso usado para convertirla en alcohol.

Hay incluso una diferencia geográfica en el *input* de energía dependiendo en cómo esté adaptada la cosecha a la región en la que se cultiva. Por ejemplo, hay una jerarquía definida de la productividad del maíz por estado dentro de los EEUU: en 2005, se cosecharon 173 búshels por acre (10.859 kg/ha) en Iowa, mientras fueron solo 113 búshels por acre en Texas (7.093 kg/ha). Esto es consistente con el principio general de “análisis de gradiente” en ecología, que mantiene que una especie de planta individual crece mejor cerca de la zona media de su espacio de gradiente; esto es, cerca del centro de su rango en condiciones medioambientales como la temperatura y la humedad del suelo. Las condiciones climáticas en Iowa están claramente en el centro del espacio de gradiente del maíz. Las estadísticas sugieren que la producción de maíz requiere también menos energía en o cerca del centro del espacio de gradiente del maíz.[73] Esto implicaría una EROEI en disminución en la producción de etanol a medida que aumenta la distancia desde Iowa, lo que significa que la distancia geográfica de la producción de maíz producirá menores rendimientos a mayores costes. En realidad, la producción de etanol en Iowa y Texas rinde balances energéticos muy diferentes, de forma que en Iowa la producción de un bushel de maíz cuesta 43 MJ, mientras en Texas cuesta 71 MJ.

Las cifras de energía neta calculadas para la producción de etanol de maíz en los EEUU van de menos de 1:1 a 1,8:1.[74]

El etanol a partir de la caña de azúcar en Brasil se calcula que tiene un EROEI de entre 8:1 y 10:1, pero cuando se hace con caña de azúcar de Luisiana en los EEUU, donde las condiciones de producción son peores, la EROEI es cercana a 1:1.[75] Las estimaciones proyectadas para la energía neta del etanol de celulosa varían ampliamente, de 2:1 a 36:1.[76]

Sin embargo, tales proyecciones deben ser vistas con escepticismo, dada la ausencia de instalaciones para la producción en funcionamiento.

Estas cifras de EROEI difieren tanto a causa de que se acredita el coproducto (es decir, se añade una cifra de retorno de energía para representar el valor del reemplazo de energía de los subproductos utilizables de la producción de etanol –principalmente DDGS-). En las cifras de la USDA para el uso de energía en la producción de etanol, el EROEI es 1,04 anterior a los créditos. Pero algunos analistas arguyen que dar crédito a la coproducción es inmaterial a la cantidad de energía requerida para producir etanol. La destilación requiere mucha energía, e incluso más en el caso del etanol celulósico porque la concentración de cerveza inicial es muy baja (alrededor de un 4 por ciento comparada con el 10 a 12 por ciento del maíz). Esto aumenta espectacularmente la cantidad de energía necesaria para vaporizar el agua restante. Como un mínimo absoluto, se necesitan 15.000 BTU de energía solo en la destilación por cada galón de etanol producido (las plantas actuales de etanol de maíz utilizan alrededor de 40.00 BTU por galón). Esto establece el límite de EROEI. Si la destilación fuese el único *input* de energía en

el proceso, y se pudiese conseguir con un mínimo termodinámico, entonces la EROEI sería aproximadamente 5:1. Pero hay otros *inputs* en el proceso y la destilación no está en el mínimo termodinámico. Las estimaciones de EROEI de la caña de azúcar y de la celulosa que se citan con frecuencia excluyen los *inputs* de combustible no fósil. Por ejemplo, una cifra de EROEI de 8 a 10:1 en la producción de etanol a partir de caña de azúcar en Brasil, excluye todo el bagazo (el residuo seco y fibroso que queda tras la extracción del jugo de los tallos de caña de azúcar prensados) quemado en la refinería –que es claramente un *input* de energía, aunque uno derivado de la caña de azúcar en sí-. Las estimaciones de EROEI del etanol celulósico asumen a menudo que la lignina recuperada de la biomasa es suficiente, no solo para abastecer de carburante a toda la planta, sino para exportar de 1 a 2 MJ de electricidad por litro de etanol producido (que se adjudica entonces al etanol). Sin embargo, esta asunción está basada en un único estudio de laboratorio que no ha sido reproducido. La cuestión de si se deberían incluir o no los *inputs* de energía no fósil en los cálculos de energía neta, y cómo tales *inputs* deberían ser medidos y evaluados, está en disputa.

PERSPECTIVAS: El futuro del etanol como uno de los combustibles más importantes para el transporte es probablemente oscuro, excepto quizás en Brasil, donde la caña de azúcar permite la única industria de etanol económicamente competitiva del mundo. El poder político del lobby del maíz en los EEUU ha mantenido el etanol de maíz subsidiado y ha mantenido el flujo de inversiones, pero el pobre rendimiento de energía neta se demostrará finalmente antieconómico. Los problemas técnicos de procesar celulosa para hacer etanol pueden finalmente ser superados, pero las consideraciones sobre el uso de la tierra y una baja EROEI probablemente limitarán la escala de producción.

14. BIODIESEL

Es este un combustible diesel no basado en el petróleo fabricado mediante la transesterificación de aceite vegetal o grasa animal (sebo) –un tratamiento químico para eliminar la glicerina, dejando alquil esterres de cadena larga (metilo, propilo, o etilo)-. El biodiesel se puede usar por sí solo en motores diesel no modificados, o mezclado con diesel de petróleo convencional. El biodiesel se distingue del aceite vegetal directo (AVD), al que a veces se denomina “aceite vegetal de desecho” (AVD), “aceite vegetal usado” (AVU), o “aceite de planta puro” (APP). El aceite vegetal puede usarse por sí mismo como combustible ya sea en solitario en motores diesel con sistemas de combustible convertido, o mezclado con biodiesel u otros combustibles.

Los aceites vegetales usados como combustible de motor en la fabricación de biodiesel se hacen normalmente de soja, canola, palma o girasol. Se ha investigado mucho para producir aceite para este propósito a partir de algas con diferentes informes de éxito (más sobre esto debajo).

La producción mundial de biodiesel alcanzó los 8,2 millones de toneladas (230 millones de galones) en 2006, con un 85 por ciento aproximadamente de la producción procedente de la Unión Europea, pero con una rápida expansión en Malasia e Indonesia.[\[77\]](#)

En los EEUU, los precios medios al por menor (en el surtidor), incluyendo los impuestos sobre el combustible estatales y federales, de B2/B5 son más bajos que el petróleo diesel en unos 12 centavos, y en las mezclas B20 son los mismos que el petrodiesel. B99 y B100 normalmente cuestan más que el petrodiesel excepto donde los gobiernos locales dan un subsidio. (El número que sigue a la “B” en “B20”, “B99”, etc. hace referencia al porcentaje de biodiesel en la formulación del combustible; en la mayor parte de los casos, el porcentaje que queda es el petróleo diesel. Así el combustible “B20” consta de un 20 por ciento de biodiesel y un 80 por ciento de petróleo diesel.)

A FAVOR: Las características medioambientales del biodiesel generalmente son más favorables que las del petrodiesel. A lo largo de su ciclo de vida, el biodiesel emite una quinta parte del CO₂ del petróleo diesel, y contiene menos sulfuro. Algunos informes sugieren que su uso lleva a una vida más larga del

motor, lo que presumiblemente reduciría las necesidades de reemplazo de los motores fabriles.[78] Cuando el biodiesel se hace de materiales de desecho como el aceite vegetal, los beneficios netos medioambientales son más pronunciados.

EN CONTRA: El principal impacto negativo de la expansión de la producción de biodiesel es la necesidad de grandes cantidades de tierra para producir productos oleicos. El aceite de palma es el más fructífero, produciendo 13 veces la cantidad de aceite de la soja, el producto para biodiesel más utilizado en los Estados Unidos. En Malasia e Indonesia, se elimina selva tropical para hacer plantaciones de palma, y se ha estimado que pasarán 100 años para que se produzcan beneficios climáticos de la producción de biodiesel de cada acre de tierra para igualar las emisiones de CO₂ por la pérdida de selva tropical.[79] La producción de aceite de palma para alimentación así como para combustible está llevando a la deforestación en todo el sudeste asiático y a la reducción del hábitat de selva tropical hasta el punto en que las especies animales más grandes, como el orangután, están amenazadas de extinción.[80] Las granjas de soja en Brasil están poniendo presión sobre la selva tropical en el Amazonas. Si la soja empieza a ser utilizada de forma extensiva para biocombustibles esta presión se incrementará.

EROEI: El primer análisis comparativo total de los ciclos de vida completos del biodiesel de soja y el etanol de grano de maíz ha llegado a la conclusión de que el biodiesel tiene un impacto mucho menor en el medio ambiente y un beneficio de energía neta mucho más alto que el etanol de maíz, pero que ninguna de las dos puede hacer mucho para cubrir la demanda energética de los EEUU.[81] Los investigadores hicieron un seguimiento de toda la energía utilizada para hacer crecer el maíz y la soja y convertirlas en biocombustibles. También examinaron cuánto fertilizante y pesticida necesitan el maíz y la soja y las cantidades de gases de efecto invernadero, óxido nitroso, fósforo y pesticidas contaminantes que liberó cada uno de ellos al medio ambiente. El estudio mostró un balance energético positivo para ambos combustibles; sin embargo, el retorno de energía variaba muchísimo: el biodiesel de soja actualmente retorna un 93 por ciento más de energía de la que se usa para producirlo (1,93:1), mientras que el etanol de grano de maíz proporciona, de acuerdo con este estudio, solamente un 25 por ciento más de energía (1,25:1). Al tratar de tales distinciones, es importante recordar que las sociedades industriales emergieron en el contexto de retornos de energía de dos dígitos -50:1 o más, lo que significa obtener cincuenta veces más energía que la invertida-

Otros investigadores han reivindicado que la energía neta del biodiesel de soja ha mejorado en la última década a causa de la mejor eficiencia en la producción, con un estudio calculando un EROEI de 3,5:1.[82] El biodiesel del aceite de palma tiene la energía neta más alta, calculado en un estudio en 9:1.[83]

PERSPECTIVAS: Preocupa, como con el etanol, que las cosechas para biodiesel compitan cada vez más por la tierra con las cosechas para alimentación en los países subdesarrollados y eleven el precio de los alimentos. La necesidad de tierra es la principal limitación para la expansión de la producción de biodiesel y es probable que restrinja la escala potencial de la industria.[84] El agua también es un factor limitante, dado que los suministros de agua para la irrigación son ya problemáticos.

El biodiesel también se puede hacer con algas, que a su vez se pueden hacer crecer sobre fuentes de carbono de desecho, como el CO₂ obtenido de las plantas de energía que queman carbón o de sedimentos de aguas residuales. El agua marina en lugar de agua dulce, se puede utilizar para producir las algas, y hay optimismo en que esta tecnología se pueda utilizar para producir cantidades significativas de carburante. Sin embargo, el proceso se encuentra todavía en fase de desarrollo. Pueden ser factores limitantes la necesidad de grandes bioreactores cerrados, el suministro de agua, la regularidad de la luz solar, y la protección térmica en los climas fríos.[85]

El biodiesel procedente de aceites y grasas de desecho seguirá siendo una fuente de combustible pequeña y local, mientras la producción de algas promete ser una tecnología de biodiesel a gran escala solo si se pueden minimizar los costes de infraestructura y mantenimiento.

15. ARENAS ASFÁLTICAS

Llamadas a veces “arenas bituminosas”, este controvertido combustible fósil está hecho de bitumen (mezclas inflamables de hidrocarburos y otras sustancias que son componentes del asfalto y el alquitrán) incrustados en arena o arcilla.

El recurso es básicamente petróleo que se formó sin una “tapa” de rocas impermeables (como esquisto, sal o anhidrita) que impidiese que las moléculas de hidrocarburo más ligeras subiesen a la superficie, y que por lo tanto se volatilizaran en lugar de permanecer atrapadas bajo tierra.

Las arenas asfálticas se pueden extraer mediante un proceso de licuefacción subterráneo *in situ* mediante la inyección de vapor, o mediante la minería con palas gigantes mecanizadas. En cualquier caso, el material es prácticamente inútil en su estado natural, y requiere un procesamiento o mejora sustancial, llamándose al producto final “crudo sintético”.

Los lugares con mayor concentración comercial de este recurso son Alberta, en Canadá, y la cuenca del Orinoco en Venezuela (donde llaman al recurso aceite pesado). La producción actual de crudo sintético en Canadá es de unos 1,5 millones de barriles por día, lo que supone un 1,7 por ciento de la producción total mundial de combustibles líquidos, o un poco menos del 0,7 por ciento del total mundial de energía.

Las reservas estimadas varían mucho, de menos de 200 mil millones de barriles de petróleo equivalente hasta 1,7 billones de barriles en Canadá ; para Venezuela, la estimación de reservas más citada de crudo extrapesado es 235 mil millones de barriles, aunque en ambos casos es probable que una gran parte de lo que ha sido clasificado como “reservas” debería ser considerada “recursos” irrecuperables dada la probabilidad de que las arenas asfálticas más profundas y de menor calidad exijan más energía para su extracción y procesamiento de la que rendirían.

A FAVOR: Las únicas ventajas de las arenas asfálticas sobre el petróleo convencional son que (1) quedan grandes cantidades por extraer, y (2) el lugar en el que se encuentran en gran cantidad (Canadá) está cercano geográficamente y es políticamente amigable al país que importa la mayor cantidad de petróleo (los EEUU).

EN CONTRA: Las arenas asfálticas tienen todas las cualidades negativas asociadas a otros combustibles fósiles (no son renovables, contaminan y cambian el clima), pero incluso en mayor medida que el gas natural o el petróleo convencional. La producción de arenas asfálticas es la fuente de más rápido crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero en Canadá, ya que la producción y uso de un barril de crudo sintético dobla en última instancia la cantidad de CO₂ que sería emitido por la producción y uso de un barril de petróleo convencional. La extracción de arenas asfálticas ya ha causado un gran daño medioambiental en toda una amplia extensión del norte de Alberta.

Todas las técnicas utilizadas para convertir las arenas asfálticas en crudo sintético requieren otros recursos. Algunas de las tecnologías requieren cantidades importantes de agua y 1200 pies cúbicos (34 metros cúbicos) de gas natural por cada barril de crudo sintético.

Como resultado, es costoso producir crudo sintético. Un coste fijo por barril en dólares no tiene

demasiado sentido dada la reciente volatilidad en el *input* de costes; sin embargo, es cierto que los costes de producción del crudo sintético son mucho más altos que los costes históricos de producción del petróleo crudo, y se comparan favorablemente únicamente con los costos más altos para la producción de un nuevo barril marginal de crudo usando nuevas y caras tecnologías.

EROEI: Es difícil valorar directamente la energía neta de las arenas asfálticas y la producción de crudo sintético. Diversos análisis en el pasado de la energía neta de las arenas asfálticas variaban de 1,5:1 a 7:1, mientras los análisis más recientes y robustos sugieren un rango de 5,2:1 a 5,8:1.[\[86\]](#) Esto es una pequeña parte de la energía neta obtenida históricamente del petróleo convencional.

PERSPECTIVAS: La Agencia Internacional de la Energía espera que la producción de crudo sintético en Canadá se expanda hasta los 5 Mb/d en 2030, pero hay buenas razones para cuestionar esta previsión. El coste medioambiental de expandir la producción hasta este punto puede ser insostenible. Además, la inversión en la expansión de arenas asfálticas está disminuyendo, con más de 60 mil millones de dólares en proyectos retrasados en los últimos tres meses de 2008 cuando el mundo entró en recesión. Una perspectiva más realista para la producción de arenas asfálticas puede ser una tasa de producción relativamente constante, elevándose quizá únicamente a 2 o 3 millones de barriles por día.

16. ESQUISTO BITUMINOSO

Si las arenas asfálticas son petróleo que se “manchó” (en el sentido que las moléculas más cortas de hidrocarburos se han volatilizado, dejando solamente bitumen difícil de usar), el esquisto bituminoso (o kerógeno, como se denomina con más propiedad) es petróleo que quedó poco cocinado: se trata de material que no fue enterrado a suficiente profundidad o el tiempo suficiente para ser transformado químicamente en las cadenas más cortas de hidrocarburo que se encuentran en el crudo o el gas natural.

Depósitos de esquisto bituminoso comercialmente extraíble existen en treinta y tres países, encontrándose los mayores en la región occidental de los EEUU (Colorado, Utah y Wyoming). El esquisto bituminoso se utiliza para hacer combustible líquido en Estonia, Brasil y China; se usa para generar electricidad en Estonia, China, Israel y Alemania; para producción de cemento en Estonia, Alemania y China y para productos químicos en China, Estonia y Rusia. En 2005, Estonia representaba el 70 por ciento mundial de la extracción y uso de esquistos bituminosos. El porcentaje de energía mundial obtenido actualmente del esquisto bituminoso es negligible, pero los recursos mundiales se estiman que son el equivalente a 2, 8 billones de barriles de combustible líquido.[\[87\]](#)

A FAVOR: Al igual que con las arenas asfálticas, el único beneficio real de los esquistos bituminosos es que hay una gran cantidad a mano. Solo en los EEUU, los recursos de esquistos bituminosos se estiman en 2 billones de barriles equivalentes de petróleo, cerca de dos veces la cantidad de reservas de petróleo convencional que queda.

EN CONTRA: El esquisto bituminoso tiene una densidad energética baja, alrededor de una sexta parte de la del carbón. El impacto medioambiental de su extracción y quemado es muy alto, e incluye una grave contaminación del aire y del agua y la liberación de nuevo de la mitad de CO₂ producido al quemar petróleo convencional. El uso de esquistos bituminosos para calefacción es mucho más contaminante que el de gas natural o incluso carbón. La extracción a gran escala en el oeste de los EEUU requeriría el uso de cantidades enormes de agua en una región árida.

EROEI: La EROEI reportada del esquisto bituminoso se encuentra generalmente en el rango de 1,5:1 a 4:1[\[88\]](#) . La energía neta para este proceso es posiblemente más baja que la obtenida de la producción de petróleo a partir de las arenas asfálticas por la propia naturaleza del material.

PERSPECTIVAS: Durante las últimas décadas la mayoría de los esfuerzos comerciales para producir

combustibles líquidos a partir de los esquistos bituminosos han terminado en fracaso. La producción mundial de esquisto bituminoso ha disminuido hoy día significativamente desde 1980. Mientras un bajo nivel de producción es posible que continúe en diversos países que no tienen otros recursos combustibles fósiles, el desarrollo a gran escala de producción a partir de depósitos de esquisto bituminoso parece improbable en ningún lugar tanto por razones económicas como medioambientales.

17. ENERGÍA MAREOMOTRIZ

La generación de electricidad a partir de la acción de las mareas está limitada geográficamente a lugares en los que hay un gran movimiento de agua cuando sube y baja la marea, como estuarios, bahías, cabos, o canales que conecten dos masas de agua.

La tecnología más antigua de generación de energía mareomotriz se remonta a la Edad Media, cuando se utilizaba para moler grano. Los diseños actuales consisten en la construcción de una barrera o presa que bloquea todo o la mayor parte del pasaje de una marea; la diferencia en la altura del agua de los dos lados de la barrera se usa para hacer funcionar unas turbinas. Una tecnología más moderna, todavía en fase de desarrollo, coloca turbinas submarinas llamadas generadores de corriente de marea directamente en la corriente de la marea.

A nivel mundial hay cerca de 0,3 GW de capacidad instalada de energía mareomotriz [89], la mayor parte producida por la barrera construida en Francia cruzando el estuario del río Rance (las barreras son esencialmente presas atravesando a lo ancho todo un estuario con mareas).

A FAVOR: Una vez se ha colocado en su lugar un sistema de generación mediante marea, éste tiene bajos costes de funcionamiento y una producción fiable, aunque no constante, libre de carbono.

EN CONTRA: Los lugares para grandes barreras están limitados a unos pocos sitios en el mundo. Los generadores de marea necesitan grandes cantidades de capital para ser construidos, y pueden tener un impacto negativo significativo sobre el ecosistema del río o bahía con la presa.

EROEI: No se han hecho todavía cálculos de la EROEI de la energía mareomotriz. Para los generadores de corriente de marea la cifra que se puede esperar estará cerca de la de la energía eólica (una EROEI media de 18:1) dado que las tecnologías de turbina para viento y agua son tan parecidas que a los generadores de corriente de marea se les ha descrito como “molinos de viento submarinos”. Sin embargo, las cifras de EROEI mareomotriz probablemente serían más bajas debido a la corrosión del agua de mar y por tanto a un uso de energía más alto para construcción y mantenimiento. La EROEI de los sistemas de barrera podría ser comparable a la de las presas hidroeléctricas (una EROEI en un rango de 11,2:1 a 267:1), pero probablemente será más baja dado que la primera solo genera energía de parte del ciclo de la marea.

PERSPECTIVAS: Una estimación del tamaño anual mundial de la generación potencial de la energía mareomotriz sería 450 TWh, la mayor parte localizada en las costas de Asia, Norteamérica y el Reino Unido.[90] Se han propuesto muchos nuevos sistemas de barrera y se han identificado nuevos sitios, pero el coste inicial es una dificultad. Hay a menudo una fuerte oposición local, como en la barrera propuesta en la boca del río Severn en el Reino Unido. Los generadores de corriente de marea necesitan menos inversión de capital y, si se diseñan y se colocan correctamente, pueden tener un impacto medioambiental muy bajo. Prototipos de turbinas y sistemas de generación de corriente de marea se están probando en todo el mundo.

18. ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Diseñada para funcionar en alta mar en aguas profundas, la energía undimotriz aprovecha el movimiento de las olas hacia arriba y hacia abajo motivado por el viento. Los sistemas en la orilla utilizan la fuerza de las olas al romper o la subida y bajada de agua para hacer funcionar bombas o turbinas.

La estimación que se suele citar para la generación potencial mundial de energía undimotriz es de alrededor de 2 TW[91], distribuida principalmente en las costas occidentales de América, Europa, el sur de África y Australia, donde las olas movidas por el viento llegan a la orilla tras acumular energía en largas distancias. Para los diseños actuales de generadores de olas el recurso económicamente explotable es probable que sea de 140 a 750 TWh por año.[92] El único sistema comercial en funcionamiento ha sido el Parque de olas Agucadora en las costas de Portugal, con 2,25 MW. (Sin embargo, recientemente fue llevado fuera de la costa, y no está claro cuándo volverá a ser reinstalado).

La investigación en la energía de las olas ha sido financiada tanto por gobiernos como pequeñas empresas de ingeniería, y hay muchos diseños de prototipos. Una vez la etapa de desarrollo haya terminado y el precio y los problemas de localización de los sistemas de energía undimotriz sean mejor comprendidos, puede haber más inversión en ellos. Para que disminuyan los costes, deben resolverse los problemas de corrosión y daños por tormenta.

A FAVOR: Una vez instalados, los aparatos de energía undimotriz emiten una cantidad negligible de gases de efecto invernadero y debería ser barato hacerlos funcionar. Dado que la mayor parte de la población mundial vive cerca de la costa, la energía de las olas es adecuada para proporcionar electricidad a muchos. También puede resultar un medio caro pero sostenible para desalar agua.

EN CONTRA: Además de los altos costes de construcción, hay preocupaciones acerca del impacto medioambiental de algunos diseños, ya que pueden interferir con los caladeros. La interferencia con la navegación y la erosión de las costas son también problemas potenciales. La energía undimotriz fluctúa estacionalmente así como diariamente ya que los vientos son más fuertes en invierno, haciendo que esta sea una fuente de energía algo intermitente.

EROEI: La energía neta de los aparatos de energía undimotriz no ha sido analizada en profundidad. Una estimación grosera de la EROEI del dispositivo portugués Pelamis es 15:1.[93]

PERSPECTIVAS: La generación de energía a partir de las olas necesitará más investigación, desarrollo y acumulación de infraestructuras antes de que se pueda valorar adecuadamente.

Se necesita entender mejor el impacto medioambiental de las “granjas” de energía undimotriz (grupos de muchas máquinas de energía de las olas) para que se puedan evitar los sitios destructivos. Los mejores aparatos deberán ser identificados y mejorados, y la producción de aparatos deberá ser mucho más barata.

OTRAS FUENTES

Además de las dieciocho fuentes de energía estudiadas, hay algunas otras fuentes potenciales que se han estudiado en la literatura sobre energía, pero que no han alcanzado la etapa de aplicación. Entre estas se encuentran: la térmica oceánica (que produciría energía a partir del diferencial de temperatura entre el agua superficial y el de profundidad en el océano), las fuentes de “punto cero” y otras “energías libres” (que se afirma que capturan energía del vacío del espacio, pero que nunca se ha demostrado que funcionen tal como se proclama), los colectores solares en órbita terrestre (que transmitirían energía eléctrica al planeta en forma de energía de microondas), helio 3 de la Luna (el helio 3 no se encuentra en cantidades capturables en la Tierra, pero podría minarse en la Luna y ser traído a la Tierra mediante una lanzadora y podría proporcionar energía a los reactores nucleares de forma más segura que el

uranio), y los hidratos de metano (metano congelado en un entramado de hielo –un material que se encuentra en grandes cantidades en la tundra y los lechos marinos, pero que nunca se ha capturado en cantidades comerciales significativas-). De estas, solo el hidrato de metano tiene alguna perspectiva de producir cantidades comerciales de energía en un futuro previsible, e incluso eso depende de desarrollos tecnológicos importantes para permitir la captura de este frágil material. El metanol y el butanol no se estudian aquí porque sus propiedades y perspectivas difieren poco de aquellas de otros biocombustibles.

Por lo tanto, en el curso de la próxima década o dos décadas, la energía para la sociedad casi con toda certeza debe venir de alguna combinación de estas dieciocho fuentes. En la siguiente sección exploraremos alguna de las posibilidades para combinar varias de estas opciones de energías alternativas para resolver la crisis de energía en marcha.

TABLE 2: COMPARING CURRENT FUEL SOURCES

	Annual electricity produced (TWh)	Reserves	EROEI
Fossil Fuels	11,455	finite	Coal 50:1 Oil 19:1 Natural gas 10:1
	Annual electricity produced (TWh)	Potential electricity production (TWh)	EROEI
Hydropower	2894	8680	11:1 to 267:1
Nuclear	2626	5300	1.1:1 to 15:1
Wind	160	83,000	18:1
Biomass power	218	NA	NA
Solar PV	8	2000	3.75:1 to 10:1
Geothermal	63	1000 – 1,000,000	2:1 to 13:1
Solar thermal	1	up to 100,000	1.6:1
Tidal	.6	450	~ 6:1
Wave	~ 0	750	15:1

Table 2. Global annual electricity generation in terawatt-hours, estimated existing reserve or potential yearly production, and EROEI.¹⁶ The largest current source of electricity (fossil fuels) has no long-term future, while the sources with the greatest potential are currently the least developed.

TABLE 3. COMPARING LIQUID FUEL SOURCES			
	Global production (million barrels/year)	Reserves (trillion barrels)	EROEI
Oil	27,000	1.2	19:1
Tar sands	548	3.3	5.2:1 to 5.8:1
Oil shale	1.6	2.8	1.5:1 to 4:1
	Global production (million barrels/year)	Potential production (million barrels/year)	EROEI
Ethanol	260	1175	0.5:1 to 8:1
Biodiesel	5	255	1.9:1 to 9:1

Table 3. Liquid fuels: Current global annual production, reserves, potential production, and EROEI.¹⁰

[95]

Cinco

HACIA UNA FUTURO MIX ENERGÉTICO

Un examen superficial de nuestra actual mezcla de energía presenta la alarmante conclusión de que alrededor del 85 por ciento de nuestra energía actual se obtiene de tres fuentes primarias –petróleo, gas natural y carbón- que no son renovables, cuyo precio es probable que tienda a crecer (y quizá de forma muy abrupta) en los próximos años, cuyo EROEI está disminuyendo y cuyo impacto ambiental es inaceptable. Aunque estas fuentes históricamente han tenido un valor económico muy alto, no podemos basarnos en ellas en el futuro. De hecho, cuanto más se retrase la transición a fuentes de energía alternativas, más difícil será la transición, a no ser que se pueda encontrar una mezcla alternativa de sistemas de energía que tenga unas características económicas y medioambientales superiores. Un proceso para diseñar un sistema de energía que cumpla las necesidades futuras de la sociedad debe empezar por reconocer las limitaciones prácticas y potenciales de las fuentes de energía disponibles. Dado que las fuentes de energía *primarias* (aquellas capaces de reemplazar los combustibles fósiles en términos de su porcentaje de energía total proporcionada) serán las más importantes para cumplir estas necesidades, es importante identificarlas primero.

Las fuentes secundarias (aquellas que son capaces de proporcionar solo un pequeño porcentaje de la energía total) también interpretarán un papel, con una gama de “transportadores de energía” (formas de energía que hacen que la energía de las fuentes primarias sean útiles más fácilmente –como la electricidad hace que la energía del carbón sea útil en millones de hogares-).

Una fuente de energía primaria debe, como mínimo, cumplir estos estándares imprescindibles:

- Debe ser capaz de proporcionar una cantidad sustancial de energía –quizá una cuarta parte de toda la energía utilizada actualmente nacional o globalmente- ;
- Debe tener un rendimiento de energía neta de 10:1 o más;
- No puede tener un impacto medioambiental (incluyendo el clima), social o geopolítico inaceptable

(como que un país obtenga un dominio político sobre otros); y

- Debe ser renovable.

UN PROCESO DE ELIMINACIÓN

Asumiendo que el petróleo, el gas natural y el carbón tendrán un papel que disminuirá rápidamente en nuestro futuro mix energético, esto deja quince fuentes de energía alternativas con diferentes perfiles económicos y diferente impacto ambiental. Dado que incluso los más robustos son actualmente solo contribuyentes relativamente menores a nuestro mix energético actual, esto significa que nuestra energía futura será muy diferente de nuestra energía actual.

La única forma de descubrir qué aspecto puede tener es continuar nuestro proceso de eliminación. Si vemos las grandes contribuciones de emisiones de gases de efecto invernadero que puedan cambiar el clima como un veto no negociable sobre las futuras fuentes de energía, esto elimina en la práctica a las arenas asfálticas y a los esquistos bituminosos del estudio.

Los esfuerzos para capturar y secuestrar el carbono de estas sustancias durante su procesamiento reducirían aún más su ya baja EROEI y elevaría sus ya altos costes de producción, así que no hay ninguna vía económicamente realista y medioambientalmente responsable para que estas fuentes de energía se escalen hasta convertirse en fuentes primarias. Esto deja otros trece candidatos. Los biocombustibles (etanol y biodiesel) deben ser excluidos por su baja EROEI, y también por los límites a la tierra y agua necesarias para su producción.

(Recordemos: no estamos sugiriendo que alguna fuente de energía no pueda representar *algún* futuro rol; simplemente estamos buscando primero las fuentes primarias –las que tengan el potencial de asumir todo o una parte importante del rol actual de los combustibles fósiles convencionales-.) La energía a partir de los residuos no es escalable; de hecho, el “recurso” base es probable que disminuya a medida que la sociedad se vuelva más eficiente energéticamente.

Esto deja diez posibilidades: nuclear, hidráulica, eólica, solar FV, concentración termal solar, solar pasiva, biomasa, geotérmica, undimotriz y mareomotriz. De estas, la nuclear y la hidráulica producen actualmente las mayores cantidades de energía. La energía hidroeléctrica no es que no tenga problemas, pero en los mejores casos su EROEI es muy alta. Sin embargo, su capacidad de crecimiento en los EEUU está gravemente limitada –no hay suficientes ríos sin presas disponibles- y a nivel mundial no puede hacer mucho más que triplicar su capacidad.

Sería lento y caro aumentar la energía nuclear. Además, estamos cerca de los límites de las vetas de uranio, y las vías tecnológicas para superar esos límites (por ejemplo con reactores de torio) exigirían una investigación costosa y con mucho tiempo. En resumen, tanto la energía hidroeléctrica como la nuclear son candidatas improbables de una rápida expansión para reemplazar los combustibles fósiles.

La producción de energía a partir de biomasa está asimismo limitada por su escalabilidad, en este caso por la tierra y agua disponible, y por la baja eficiencia de la fotosíntesis. América y el mundo podrían obtener más energía de la biomasa, y la producción de *biochar* (una forma de carbón, normalmente fabricada de desperdicios agrícolas, usada como correctivo para el suelo) eleva la posibilidad de un proceso sinérgico que produciría energía y a la vez construiría suelo y capturaría carbono atmosférico (aunque algunos analistas dudan de esto porque la pirolisis, el proceso de creación de carbón, emite no solo CO₂ sino también otros contaminantes peligrosos).

La competición con otros usos de la biomasa para alimentos y para *inputs* agrícolas de baja energía limitará la cantidad de material vegetal disponible para la producción de energía. Siendo realistas, dados los límites mencionados, no se puede esperar que la biomasa produzca de forma sostenible energía al nivel del petróleo, el gas o el carbón.

La energía solar pasiva es excelente para calentar espacios, pero no genera energía que pueda ser utilizada para hacer funcionar sistemas de transporte y otros elementos esenciales de una sociedad industrial.

Esto deja seis fuentes: eólica, solar FV, de concentración solar térmica, geotérmica, undimotriz y mareomotriz –que todas juntas producen actualmente una pequeña parte de la energía total mundial-. Y cada una de estas tiene sus propios retos –como la intermitencia o el limitado potencial de crecimiento-.

La generación de electricidad mareomotriz, undimotriz y geotérmica es improbable que sea escalable; aunque las bombas de calor geotérmicas se pueden utilizar casi en cualquier parte, no pueden producir energía primaria para las redes de transporte o electricidad.

La energía solar fotovoltaica todavía es cara. Aunque empiezan a llegar al mercado materiales FV más baratos, estos generalmente se basan en sustancias raras cuyo agotamiento podría limitar el desarrollo de la tecnología. La concentración FV promete resolver alguna de estas dificultades; sin embargo, se necesita más investigación y el problema de la intermitencia permanece. Con una buena colocación geográfica, la eólica y la de concentración solar térmica tienen buenas características de energía neta y ya son capaces de producir energía a precios asumibles. Estas podrían ser las mejores candidatas como fuentes de energía primaria no fósil –pero también sufren de intermitencia-. Por lo tanto no hay una sola fuente de energía “bala de plata” capaz de reemplazar los combustibles fósiles convencionales directamente –al menos hasta que se pueda solucionar el problema de la intermitencia- aunque varias de las fuentes presentadas ya sirven, o son capaces de servir, como fuentes de energía secundarias.

Esto significa que a medida que las fuentes fósiles se agotan, y a medida que la sociedad reduzca su dependencia de ellas para evitar un impacto climático catastrófico, tendremos que usar todas las fuentes alternativas de energía disponibles de manera estratégica. En lugar de una bala de plata, tenemos en nuestro arsenal solamente BBs, cada una de ellas con un perfil único de fortalezas y debilidades que deben tenerse en cuenta. Pero como estas fuentes alternativas de energía son tan diversas, y nuestras formas de usar energía son también diversas, tendremos que encontrar la forma de conectar fuente, distribución, almacenamiento y consumo en un sistema coherente mediante portadores de energía comunes.

LOS PORTADORES COMUNES: ELECTRICIDAD E HIDRÓGENO

Aunque la sociedad usa el petróleo y el gas en su estado más o menos natural (en el caso del petróleo, lo refinamos a gasolina o lo destilamos a diesel antes de meterlo en nuestros depósitos), estamos acostumbrados a transformar otras formas de energía (como el carbón, la hidroeléctrica y la nuclear) a electricidad –que es energía en una forma que es fácil de usar, transportable por cables, y que hace funcionar motores y toda una serie de otros aparatos con gran eficiencia-.

Con una más amplia diversidad de fuentes entrando en el sistema energético global, la elección de un portador de energía y su posterior integración con el transporte y la calefacción (que ahora descansa principalmente en los combustibles fósiles directamente), se convierte en un asunto importante. Desde hace más o menos una década los expertos en energía han debatido si el mejor portador de energía para un régimen energético de combustibles postfósil será la electricidad o el hidrógeno.[\[96\]](#) Los

argumentos a favor del hidrógeno son los siguientes: nuestro actual sistema de transporte (que incluye coches, camiones, barcos y aviones) usa casi exclusivamente combustibles fósiles. Una transición a la electrificación supondría tiempo, actualizaciones e inversión, y se enfrentaría a dificultades con el almacenamiento de electricidad (discutido abajo con más detalle): además los límites físicos de la densidad energética por peso de las baterías eléctricas significaría que los barcos, los grandes camiones y los aviones probablemente nunca se podrían electrificar en grandes cantidades. El problema es tan básico que continuaría aunque se mejorasen sustancialmente las baterías. El hidrógeno se podría almacenar de forma más efectiva en algunas situaciones, y por tano podría parecer una mejor opción como portador de energía para el transporte. Además, el hidrógeno se podría generar y almacenar en casa para la calefacción y la generación de electricidad, así como para proveer de combustible al coche familiar.

Sin embargo, como el hidrógeno tiene una densidad energética muy baja por unidad de volumen, el almacenamiento es también un problema en este caso: los aviones que utilizasen hidrógeno necesitarían unos depósitos enormes que supondrían una proporción sustancial del tamaño del avión, y los automóviles también necesitarían depósitos muchos más grandes. Además, se deberían resolver diversas dificultades tecnológicas antes de que las células de combustible –que serían el medio ideal para convertir la energía del hidrógeno en electricidad utilizable- pudiesen estar ampliamente disponibles. Y como la conversión de energía no es nunca un 100 por 100 eficiente, convertir energía de electricidad (de origen solar o eólico, por ejemplo) a hidrógeno para almacenamiento antes de convertirla de nuevo en electricidad para su uso final implicaría inevitablemente ineficiencias importantes.

Los problemas con el hidrógeno son tan básicos que muchos analistas han llegado por ahora a la conclusión de que su rol en los futuros sistemas de energía será limitado (probablemente nunca veremos una “economía del hidrógeno”), aunque para algunas aplicaciones ciertamente puede tener sentido. Las sociedades industriales ya tienen una infraestructura para la distribución de electricidad. Además, la electricidad tiene algunas ventajas inherentes sobre los combustibles fósiles: se puede convertir en trabajo mecánico con mucha mayor eficiencia que la gasolina quemada en los motores de combustión interna, y se puede transportar a largas distancias de forma mucho más fácil que el petróleo (que es por lo que los trenes de alta velocidad en Europa y en Japón funcionan con electricidad en lugar de con diesel). Pero si la electricidad es escogida como portador de energía sistémico, los problemas con una mayor electrificación del transporte usando fuentes de energía renovables como las energías eólica, solar, geotérmica y undimotriz continuarán: ¿cómo superar la baja densidad energética de las baterías eléctricas, y cómo mover de forma eficiente la electricidad de lugares remotos de producción a distantes centros de población?[97]

ALMACENAMIENTO Y TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA

Las densidades energéticas por peso del petróleo (42 megajulios por kilogramo), el gas natural (55 MJ/kg), y el carbón (20 a 35 MJ/kg) son de lejos mucho mayores que las de cualquier medio de almacenamiento de electricidad disponible actualmente. Por ejemplo, una típica batería de ácido/plomo puede almacenar alrededor de 0,1 MJ/kg, alrededor de una quinta parte de un 1 por ciento de la energía por libra del gas natural. Las mejoras potenciales de las baterías de ácido/plomo están limitadas por la química y la termodinámica, con un límite superior de menos de 0,7 MJ/kg.

Las baterías de iones de litio han mejorado la densidad energética de las de ácido/plomo por un factor de 6 aproximadamente, alcanzando alrededor de 0,5 MJ/kg; pero su densidad energética teórica es de unos 2 MJ/kg, o quizás 3 MJ/kg si la investigación para la sustitución de sílice por carbono en los ánodos se lleva a la práctica. Por otra parte, los suministros de litio están limitados y no son por tanto

escalables. Es posible que otros elementos pudiesen conseguir un mayor almacenamiento de energía por peso. En principio, los compuestos de hidrógeno-escandio, si se pudiesen usar en una batería, podrían alcanzar un límite de alrededor de 5 MJ/kg. Por tanto las mejores baterías existentes obtienen aproximadamente un 10 por ciento de lo que es físicamente posible y un 25 por ciento del límite superior demostrado.

La energía se puede almacenar en campos eléctricos (mediante condensadores) o en campos magnéticos (con superconductores). Aunque los mejores condensadores almacenan hoy una veintava parte de la energía de una masa igual de baterías de iones de litio, una nueva compañía llamada EEstor afirma disponer de un condensador cerámico capaz de almacenar 1 MJ/kg. Los sistemas de almacenamiento de energía magnéticos existentes almacenan alrededor de un 0,01 MJ/kg, más o menos lo mismo que los condensadores existentes, aunque los electroimanes hechos de superconductores de alta temperatura podrían en teoría almacenar alrededor de 4 MJ por litro, lo que es similar al rendimiento de las mejores baterías imaginables.

La energía química potencial (una propiedad de la estructura atómica o molecular de los materiales que crea la posibilidad de liberar energía y convertirla en formas utilizables –como es el caso de los combustibles fósiles y otras materias combustibles-) se puede almacenar como combustible inorgánico que es oxidado por el oxígeno atmosférico. Las baterías de zinc aire, que suponen la oxidación de metal de zinc a hidróxido de zinc, podrían conseguir unos 1,3 MJ/kg, pero el óxido de zinc podría teóricamente superar las mejores baterías imaginables con alrededor de 5,3 MJ/kg. Una vez más, el hidrógeno se puede usar para almacenamiento. La investigación se mueve hacia sistemas de construcción a escala que usarían células solares para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno durante el día y usar una célula de combustible para convertir los gases en electricidad durante la noche.[98] Sin embargo, como se ha discutido arriba, esta tecnología todavía no es económica.[99] Se necesitará un mejor almacenamiento de la electricidad en diferentes puntos dentro del sistema global de energía si se van a eliminar los combustibles fósiles. No solamente los vehículos necesitarán baterías eficientes, sino que los operadores de una red basada cada vez más en fuentes intermitentes como la eólica y la solar necesitarán vías para almacenar el exceso de electricidad en algunos momentos de sobreabundancia para los momentos de pico de uso o escasez. El almacenamiento de energía a gran escala lo hacen ya los pantanos hidroeléctricos al bombear agua hacia arriba, hacia los depósitos, de noche, cuando hay un superávit de electricidad: se pierde energía en el proceso, pero en cualquier caso se consigue un beneficio económico neto. Esta práctica se podría extender, pero está limitada por el número y tamaño de las presas, bombas y pantanos existentes. El almacenamiento de energía a gran escala por medio de volantes de inercia gigantes se está estudiando, pero tales dispositivos serán probablemente costosos.

La situación con la transmisión también es desalentadora. Si se van a capturar grandes cantidades de energía eólica y solar de áreas remotas y se van a integrar en sistemas de red nacionales y globales, se necesitarán nuevas líneas de alta capacidad, además de comunicaciones en las dos direcciones robustas, sensores avanzados y ordenadores distribuidos para mejorar la eficiencia, la fiabilidad y la seguridad de la distribución y uso de energía.

Solo en los EEUU, el coste de una actualización así de la red sería como mínimo de 100 mil millones de dólares, según un reciente estudio.[100] El nuevo sistema propuesto que era la base del estudio, incluiría 15.000 millas de circuitos de líneas de extremadamente alto voltaje, extendidas a lo largo de la infraestructura eléctrica actual, comenzando en las Grandes Llanuras y el Medio oeste (donde se encuentra el grueso de los recursos eólicos del país) y terminando en las grandes ciudades de la costa Este. El coste de construir las turbinas eólicas para generar la cantidad de energía asumida en el estudio añadiría otros 720 mil millones, gastados en un periodo de quince años y financiados principalmente

por empresas de servicio público e inversores.

Pero este hipotético proyecto permitiría al país obtener solamente un 20 por ciento de su electricidad del viento en 2024. Si se necesita o se desea una transición más rápida y completa desde los combustibles fósiles, el coste presumiblemente sería mucho más alto.

Sin embargo, muchos especialistas en energía insisten en que *no* se necesitarían líneas de alta capacidad en un sistema de red eléctrica con energías renovables: un sistema así sería mejor que tomase ventaja de los recursos regionales –el viento de alta mar en el Noreste de los EEUU, la solar térmica activa en el desierto del Sudoeste, la hidroeléctrica en el Noroeste y la biomasa en el boscoso sudeste-. Una descentralización o sistema “distribuido” ahorraría así no solo la necesidad de construir costosas líneas de alta capacidad sino también evitaría las pérdidas de energía fraccionales asociadas a la transmisión a larga distancia.[\[101\]](#) Pero sigue habiendo problemas: una de las ventajas de una red a nivel continental para las renovables sería su capacidad de compensar la intermitencia de fuentes de energía como la solar y la eólica. Si los cielos están cubiertos en una región, es posible que el sol todavía brille o que sople el viento en algún otro lugar del continente. Sin un sistema de transmisión a larga distancia, debe haber alguna solución local al interrogante del almacenamiento de electricidad.

PLANES DE TRANSICIÓN

Como se dijo anteriormente, hay bastante literatura sobre planes de transición para apartarse de los sistemas de energía basados en los combustibles fósiles en EEUU o en el mundo. Sería imposible tratar aquí estos planes con detalle, excepto remarcar que algunas de estas propuestas incluyen la energía nuclear[\[102\]](#) mientras otras la excluyen[\[103\]](#). Y algunos ven una transición relativamente fácil a la energía solar y la eólica[\[104\]](#) mientras otros no[\[105\]](#).

El presente análisis, que tiene en cuenta la EROEI y otros límites de las fuentes de energía disponibles, sugiere, primero, que la transición es inevitable y necesaria (ya que los combustibles fósiles se están agotando rápidamente y se caracterizan también por una EROEI que disminuye rápidamente), y que la transición no será ni fácil ni barata. Es más, es razonable concluir por lo que hemos visto que reemplazar completamente la energía actualmente procedente de combustibles fósiles con energía de fuentes alternativas es probablemente imposible a corto plazo; puede ser irreal esperararlo incluso en periodos más largos de tiempo.

El núcleo del problema, que es de enormes proporciones, es este: ¿Cómo podemos reemplazar con éxito un almacén concentrado de energía solar (esto es, combustibles fósiles que se formaron a partir de plantas que hace mucho tiempo capturaron bioquímicamente y almacenaron la energía de la luz del sol) con un *flujo* de energía solar (en cualquiera de las diversas formas en que está disponible, incluyendo la luz solar, el viento, la biomasa y el agua en movimiento)?

No está entre los propósitos de este estudio el diseñar otro plan detallado de transición. Tales ejercicios son útiles, pero inevitablemente las decisiones sobre cuánto de este hipotético mix de energía debería venir de cada una de las fuentes potenciales (eólica, solar, geotérmica, etc.) dependen de proyecciones que tengan en cuenta los desarrollos tecnológicos y las tendencias económicas. El plan final puede consistir en un complejo conjunto de escenarios, con niveles en aumento de detalle añadiéndose al valor del documento como herramienta analítica; pero muy frecuentemente los sucesos políticos y económicos del mundo real convierten estos escenarios en sueños imposibles olvidados.

La utilidad real de los planes de transición energética se encuentra más en mostrar que está es posible que en prever los acontecimientos. Para este propósito, incluso ejercicios muy simples pueden a veces

ser útiles para señalar problemas de escala. Por ejemplo, los siguientes tres escenarios para la energía mundial, que suponen una única fuente energética alternativa usando supuestos extremadamente optimistas, pone las necesidades energéticas futuras de la humanidad ante unas perspectivas de coste que hacen pensar. [106]

Escenario 1: El mundo según los estándares americanos.

Si la población del mundo se estabilizase en 9 mil millones en 2050, llevar a toda la población mundial al consumo anual de energía de los EEUU (100 quads [N. del trad. un quad son 1015 British thermal unit (BTU), o cerca de $1,055 \times 10^{18}$ julios de BTU]) exigiría 6000 quads por año. Esto es más de doce veces la producción total actual de energía mundial.

Si suponemos que el coste de los paneles solares se puede reducir a 50 centavos por vatio instalado (una décima parte del coste actual y menos que el coste actual de carbón), sería necesaria una inversión de 500 billones de dólares para la transición, sin contar la construcción de la red eléctrica y otros costes suplementarios –una suma casi inimaginablemente grande-. Este escenario es por tanto extremadamente improbable.

Escenario 2: El mundo según los estándares europeos.

Dado que los europeos ya viven bastante bien usando solo la mitad de energía que los americanos, es evidente que un estándar de vida estadounidense es un objetivo innecesariamente alto para el mundo en su conjunto. Supongamos que optamos por una tasa de consumo global per cápita un 70 por ciento más baja que la de los Estados Unidos. Conseguir este estándar, suponiendo de nuevo una población de 9 mil millones, requeriría una producción total de energía de 1800 quads por año, todavía tres veces por encima del nivel actual. Paneles solares baratos para proporcionar toda esta energía costarían 150 billones de dólares, una cifra que sobrepasa en más del doble el Producto Interior Bruto mundial anual. Este escenario es concebible, pero altamente improbable.

Escenario 3: El actual uso per cápita de energía.

Supongamos ahora que se mantiene el actual uso mundial de energía sobre una base per cápita. Si la gente en los países menos industrializados va a consumir más, esto debe ser compensado con una reducción del consumo en los países industrializados, de nuevo con una población estabilizada en 9 mil millones. En este caso, el mundo consumiría 700 quads de energía por año. Este nivel de uso de energía, si tuviese que venir todo de paneles solares baratos, requeriría 60 billones de dólares en inversión –todavía una cifra enorme, aunque se podría conseguir con tiempo-. (El consumo mundial medio actual per cápita es de 61 gigajulios por año; en Qatar es 899 GJ por año, en los EEUU es 325 GJ por año, en Suiza es 156 GJ por año y en Bangladesh es 6,8 GJ por año. El abanico es muy amplio. Si los americanos fuesen a reducir su uso de energía a la media mundial, esto exigiría una contracción a menos de una quinta parte de los niveles de consumo actuales, pero este mismo estándar permitiría a los ciudadanos de Bangladesh aumentar su consumo de energía per cápita por nueve.)

Naturalmente, como se dijo antes, estos tres escenarios son extremadamente simples. Por una parte, no tienen en cuenta las cantidades de energía que ya vienen de las hidroeléctricas, la biomasa, etc., que presumiblemente se podrían mantener: no sería necesario producir toda la energía necesaria a partir de nuevas fuentes. Pero por otra parte, los costes de construcción de la red y la electrificación del transporte no están incluidos. Ni lo están los recursos materiales necesarios. Puesto todo en la balanza, los costos citados de los tres escenarios están con toda probabilidad, si acaso, enormemente subestimados.

La conclusión de estos escenarios parece ineludible: a no ser que los precios de la energía caigan de

una forma sin precedentes y nunca vista, la economía del mundo probablemente se va a ver cada vez más limitada a medida que los combustibles fósiles se agoten y sean eliminados gradualmente por razones medioambientales. Es extremadamente improbable que el mundo entero llegue alguna vez a alcanzar un nivel americano o ni siquiera europeo de consumo de energía, e incluso el mantenimiento de los actuales niveles de consumo exigirían inversiones enormes.

TABLE 4. ENERGY USE BY (SELECTED) COUNTRIES, 2006 (Source: U.S. Energy Information Administration¹⁰⁷)

COUNTRY	Per capita energy use (Million Btu)	Total energy use (Quadrillion Btu)	COUNTRY	Per capita energy use (Million Btu)	Total energy use (Quadrillion Btu)
Afghanistan	0.6	0.018	Korea, South	193.4	9.447
Albania	34.3	0.123	Kuwait	469.8	1.136
Algeria	46.6	1.536	Laos	3.6	0.023
Angola	13.7	0.165	Lebanon	53.3	0.207
Argentina	79	3.152	Liberia	2.5	0.008
Australia	276.9	5.611	Libya	132	0.779
Austria	187.2	1.534	Lithuania	97	0.348
Bangladesh	5	0.743	Madagascar	2.2	0.042
Belgium	265.1	2.751	Malaysia	104.8	2.557
Benin	4.9	0.039	Mali	1.1	0.013
Bolivia	24.2	0.218	Mexico	68.5	7.357
Botswana	33.1	0.059	Mongolia	33	0.096
Brazil	51.2	9.635	Morocco	15.2	0.508
Bulgaria	121.5	0.897	Mozambique	10.6	0.218
Burkina Faso	1.3	0.019	Namibia	29.3	0.06
Burma (Myanmar)	5	0.236	Nepal	2.4	0.068
Cambodia	0.7	0.01	Netherlands	250.9	4.137
Cameroon	5	0.088	New Zealand	211.2	0.864
Canada	427.2	13.95	Nicaragua	12.8	0.071
Chad	0.3	0.003	Niger	1.3	0.017
Chile	77.6	1.254	Nigeria	7.8	1.023
China	56.2	73.808	Norway	410.8	1.894
Colombia	29.8	1.305	Pakistan	14.2	2.298
Congo (Kinshasa)	1.6	0.097	Peru	21.6	0.613
Costa Rica	43.6	0.178	Philippines	14.2	1.271
Croatia	92.1	0.414	Poland	100.1	3.856
Cuba	35.1	0.399	Qatar	1,023.3	0.906
Czech Republic	176.6	1.808	Romania	75.2	1.678
Denmark	161.3	0.879	Russia	213.9	30.386
Ecuador	31	0.42	Rwanda	1.4	0.013
Egypt	32.2	2.544	Saudi Arabia	255	6.891
El Salvador	19.2	0.131	Senegal	6.9	0.084
Estonia	175.2	0.232	Sierra Leone	2.8	0.017
Ethiopia	1.4	0.103	Singapore	476.8	2.142
France	180.7	11.445	Solomon Islands	5.4	0.003
Germany	177.5	14.629	Somalia	1.2	0.01
Ghana	7.1	0.159	South Africa	117.2	5.177
Greece	139.1	1.487	Spain	161.2	6.51
Greenland	149.3	0.008	Sri Lanka	10.5	0.218
Guatemala	16.3	0.202	Sudan	4.8	0.185
Guinea	2.4	0.023	Swaziland	15	0.017
Guyana	29.4	0.023	Sweden	245.8	2.216
Haiti	3.3	0.028	Switzerland	170.7	1.284
Honduras	17.3	0.127	Syria	42.9	0.81
Hong Kong	167.7	1.164	Taiwan	200.6	4.569
Hungary	114.7	1.145	Tanzania	2.1	0.08
Iceland	568.6	0.17	Thailand	57.9	3.741
India	15.9	17.677	Turkey	55.5	3.907
Indonesia	17.9	4.149	Uganda	1.2	0.035
Iran	118.2	7.686	Ukraine	125.9	5.871
Iraq	46.6	1.247	United Arab Emirates	577.6	2.464
Ireland	173.4	0.704	United Kingdom	161.7	9.802
Israel	123.5	0.848	United States	334.6	99.856
Italy	138.7	8.069	Uruguay	38.8	0.134
Japan	178.7	22.786	Venezuela	124.4	3.191
Jordan	52.2	0.308	Vietnam	16.6	1.404
Kazakhstan	195.3	2.975	Yemen	12.4	0.267
Kenya	5.6	0.202	Zambia	11.1	0.126
Korea, North	41.1	0.949	Zimbabwe	15	0.183

LOS ARGUMENTOS PARA LA CONSERVACIÓN

El problema central sigue siendo como continuar proporcionando energía en un mundo en el que los recursos están limitados y están disminuyendo. La solución será mucho más fácil si encontramos formas de *reducir* de forma proactiva la demanda de energía. Y este proyecto a su vez se vuelve mucho más fácil si cada vez hay menos de nosotros queriendo usar energía (esto es, si la población disminuye en lugar de seguir creciendo).

Basándose en todo lo que hemos expuesto, la conclusión clara es que el mundo casi con toda certeza tendrá menos energía disponible en el futuro, no más, aunque (por desgracia) esta fuerte probabilidad no se ve reflejada todavía en las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía o en cualquier otra fuente oficial. Los suministros de combustibles fósiles casi con toda seguridad disminuirán más rápidamente que las alternativas que puedan reemplazarlos. Las nuevas fuentes de energía en muchos casos tendrán *menos* energía neta que la que han tenido los combustibles fósiles convencionales, y requerirán nuevas y caras infraestructuras para superar los problemas de intermitencia, tal como hemos planteado.

Además, las tendencias actuales hacia una disminución de la demanda de energía, combinada con una caída en las tasas de inversión para nuevos suplementos de energía (especialmente de combustibles fósiles), resultado de la crisis económica mundial en curso, posiblemente continuarán durante unos años, complicando así tanto un reconocimiento general del problema como una respuesta coordinada.

¿Cuánto caerán los suministros y con qué velocidad? Teniendo en cuenta la disminución que lleva hacia el agotamiento de la producción de petróleo y gas natural, la estabilización de la energía procedente del carbón y la reciente disminución de la inversión en el sector de la energía, puede ser razonable esperar una reducción de la disponibilidad de la energía global de un 20 por ciento o más durante el próximo cuarto de siglo. Tomando en consideración el crecimiento de la población esperado, esto implica sustanciales reducciones per cápita de la energía disponible.

Estas disminuciones es muy poco probable que se distribuyan equitativamente entre los países, sino los importadores de petróleo y gas siendo golpeados con más fuerza, y los países más pobres viendo un retorno de los consumos de energía a niveles preindustriales (con la energía procediendo casi completamente de las cosechas de alimentos y los bosques y el trabajo siendo realizado casi enteramente con energía muscular).

Por tanto, la cuestión a la que se enfrenta el mundo ya no es *si* reducir el consumo de energía, sino *cómo*. Los políticos podrían escoger gestionar la energía de forma poco inteligente (manteniendo la dependencia de los combustibles fósiles tanto como sea posible mientras se hace una pobre elección de alternativas, como los biocombustibles o las arenas asfálticas, y se invierte de forma insuficiente en las opciones de lejos mucho más prometedoras como la eólica y la solar). En este último caso, el resultado será catastrófico. Los sistemas de transporte se atrofiarán (especialmente los que se basan en los vehículos que utilizan la energía de forma más intensa –como los aviones, automóviles y camiones-). El comercio mundial se contraerá enormemente puesto que los envíos serán mucho más caros. Y los sistemas alimentarios dependientes de la energía se tambalearán a medida que los productos químicos y los costes del transporte se disparen. Todo esto podría a su vez llevar a un muy alto desempleo de larga duración y quizá incluso al hambre.

Sin embargo, si los políticos gestionan el descenso de energía de forma inteligente se podría mantener una aceptable calidad de vida tanto en los países industrializados como en los menos industrializados a un nivel más igualitario que el actual. Al mismo tiempo, las emisiones de gases de efecto invernadero se podrían reducir enormemente. Esto exigiría una campaña pública importante para el establecimiento de una nueva ética de la conservación aceptada ampliamente que reemplazase el énfasis actual en el crecimiento ininterrumpido y en el sobreconsumo tanto a nivel personal como institucional-empresarial. No intentaremos hacer aquí una lista completa de los cambios necesarios, pero bien podrían incluir los siguientes esfuerzos prácticos, basados en la ingeniería:

- Énfasis inmediato en una mayor inversión pública en la construcción de sistemas de tránsito mediante raíles y otros sistemas públicos de transporte (incluyendo carriles bici y para peatones), así como el rediseño de las ciudades para reducir la necesidad del transporte humano motorizado.[\[108\]](#)
- Investigación, desarrollo y construcción de sistemas de redes eléctricas que permitan *inputs* de energía distribuida, intermitente y renovable.

- Modernización de la reserva de edificios para una máxima eficiencia energética (la demanda de energía para la calefacción se puede reducir enormemente mediante el superaislamiento de estructuras y un diseño que maximice el aprovechamiento solar).[\[109\]](#)

- Reducción de la necesidad de energía en el bombeo y procesamiento del agua mediante programas intensivos de conservación del agua (actualmente se usa una cantidad considerable de energía en mover el agua, lo que es esencial tanto para la agricultura como para la salud humana).[\[110\]](#)

Asimismo, se necesitarán las siguientes iniciativas basadas en la política:

- Internalización de todos los costes de energía de forma que reflejen su precio real. Eliminación de los subsidios energéticos perversos, especialmente todo apoyo a la producción (*upstream* y *production-side state*). Favorecer las “tarifas reguladas” gubernamentales que favorezcan una producción de energía sostenible y renovable.

- Aplicación de los diez criterios de valoración energética citados en este documento para todas las tecnologías de energía que se proponen actualmente en las negociaciones sobre el clima de la ONU, para la “transferencia tecnológica” de los países ricos a los pobres.

- Relocalización de gran parte de la actividad económica (especialmente la producción y distribución de elementos y materiales voluminosos esenciales) para disminuir la necesidad de energía para el transporte[\[111\]](#); en la misma medida, una inversión del reciente énfasis en sistemas económicos globalizados intrínsecamente despilfarradores.

- Una rápida transición de sistemas alimenticios de producción industrial orientada a la exportación hacia una producción más local para el consumo local, reduciendo así la mecanización, los *inputs* de energía y los costes petroquímicos y de transporte[\[112\]](#). También, un respaldo creciente a la permacultura y la producción orgánica de alimentos. Y un firme apoyo a las comunidades locales tradicionales de granjeros del Tercer Mundo en su resistencia creciente a la agricultura de exportación industrial.

- Un cambio importante hacia la *reruralización*, es decir, crear incentivos para que la gente vuelva a la tierra, mientras tantas zonas urbanas como sea posible se dedican a la producción sostenible de alimentos, incluyendo las tierras suburbanas que se usan actualmente para jardines y prados

decorativos.

- Abandono del *crecimiento económico* como el estándar para medir el progreso económico y el establecimiento de un estándar universal más equitativo de “suficiencia”.
- Aumento de los requerimientos de reserva de las instituciones prestatarias para limitar el crecimiento industrial rampante hasta que los indicadores de precios reflejen todos los costes.
Restricciones a unas finanzas basadas en la deuda.
- Desarrollo de indicadores de salud económica para reemplazar el cálculo actual de PIB con uno que refleje mejor el bienestar general de los seres humanos.
- *Reintroducción* del una vez popular modelo de “sustitución de las importaciones” (de los años 30) a través del cual los países deciden satisfacer las necesidades básicas –alimentación, energía, transporte, vivienda, salud pública, etc.- *localmente* si pueden hacerlo, más que mediante el comercio mundial.
- Establecimiento de protocolos internacionales tanto sobre la valoración energética (incluyendo estándares para valorar la EROEI y los impactos medioambientales) como sobre la valoración tecnológica. Esta última debería incluir análisis de ciclos de vida de energía completos, así como los principios de que “el que contamina paga” y el “principio de precaución”.
- Adopción de protocolos internacionales de agotamiento para el petróleo, el gas y el carbón –obligando a una reducción gradual de la producción y consumo de estos combustibles en una tasa porcentual anual equivalente a la tasa anual actual de agotamiento, como se subrayaba en el libro anterior del autor *El protocolo de agotamiento del petróleo*, hasta reducir la volatilidad del precio de los combustibles-.
- Transformación de las reglas de comercio mundial para recompensar a los gobiernos, en lugar de castigarlos, por proteger y animar a la localización de la producción económica y de los modelos de consumo.
- Medidas agresivas para una “gestión desde el lado de la demanda”» que reduzca las necesidades energéticas globales, especialmente en las redes eléctricas. Esto formaría parte de un “cerrar el grifo” de toda la sociedad, es decir, una reducción planificada de toda la actividad económica incluyendo los rendimientos de energía, transporte y material, enfatizando la conservación sobre el uso de nuevas tecnologías como solución central a los problemas crecientes.
- Apoyo internacional a los derechos reproductivos y de salud de las mujeres, así como a la educación y a la igualdad de oportunidades, como pasos importantes hacia la mitigación de la crisis de población y su impacto sobre el agotamiento de los recursos.
- Devolver el control del grueso de los recursos naturales mundiales que quedan de las empresas y las instituciones financieras en los países industrializados a los pueblos de los países menos industrializados en los que se encuentran estos recursos.

El objetivo de todos estos esfuerzos debe ser la puesta en marcha de una economía de no crecimiento, *de estado estacionario*, más que de una economía basada en el crecimiento. Esto es así porque la energía y la actividad económica están fuertemente unidas: sin el crecimiento continuo de la energía disponible, las economías no se pueden expandir. Es verdad que las mejoras en la eficiencia, la introducción de nuevas tecnologías, y el cambio de énfasis de la producción básica a la provisión de

servicios puede permitir algún crecimiento económico en sectores específicos sin un incremento en el consumo de energía. Pero estas tendencias tienen límites intrínsecos. A largo plazo, los suministros de energía estáticos o en caída deben reflejarse en una estasis o contracción económica. Sin embargo, con una adecuada planificación no hay razón para que, bajo tales circunstancias, no se pudiese mantener una aceptable calidad de vida.[\[113\]](#) Para el mundo en su conjunto, esto podría implicar el diseño de un plan deliberado de redistribución global del consumo de energía sobre una base más equitativa, con los países industriales reduciendo el consumo sustancialmente y los países menos industrializados aumentando algo su consumo para promover una “suficiencia” global para todos los pueblos.

Una fórmula como esta podría compensar parcialmente los siglos de expropiación colonial de los recursos de los países pobres del mundo, un hecho histórico que ha tenido mucho que ver con rápido crecimiento industrial de los países ricos a la caza de recursos durante los últimos 150 años. Abordar esta disparidad podría ayudar a proporcionar a los países más pobres una oportunidad para la supervivencia, si no a la equidad.

Algunas buenas noticias: hay una literatura considerable sobre cómo la gente en los países recientemente opulentos pueden reducir el consumo de energía y a la vez aumentar realmente sus niveles de satisfacción personal y resiliencia.[\[114\]](#) Los ejemplos son legión, e incluyen exitosos jardines comunitarios, compartición de viajes, compartición de trabajo y amplios programas de inversión local y conservación, como menciona Jerry Mander brevemente en el Prólogo, incluyendo notablemente al movimiento de Comunidades en Transición que se está extendiendo por Europa y comenzando en los EEUU.

Aunque el tema está, hablando estrictamente, más allá del alcance de este folleto, se debe hacer notar y subrayar que los esfuerzos de conservación global se requieren y se requerirán con respecto a *todos* los recursos naturales (no solo recursos energéticos). Los suministros de la Tierra de vetas de alta calidad son limitados, y la escasez de un amplio abanico de minerales, incluyendo el fósforo, el coltán y el zinc se está ya produciendo o se espera en el curso de las próximas décadas si siguen los modelos de consumo. La deforestación, la pérdida de suelo debida a la erosión y el (en muchos casos) catastrófico e irreversible declive de las especies pesqueras en los océanos son también serios problemas que posiblemente socavarán la actividad económica y el bienestar humano en los años por venir. Por tanto, todas las suposiciones estándar que circulan sobre el futuro de la sociedad industrial están claramente abiertas a la duda.

La adaptación social a los límites de los recursos inevitablemente plantea la cuestión de la población. Cuando la población crece pero la economía sigue con el mismo tamaño, hay menos bienes económicos por persona. Si las constricciones energéticas y materiales imponen efectivamente un tapón al crecimiento económico la única forma de evitar la disminución continua en el acceso per cápita a los bienes económicos es limitar la población, por ejemplo, proporcionando incentivos económicos para las pequeñas familias en lugar de para las grandes (Nota : en los Estados Unidos las familias con más miembros se ven ahora recompensadas con menores impuestos), así como un acceso fácil a los métodos de control de la natalidad y el apoyo a las mujeres pobres para que obtengan niveles más altos de educación. Los políticos deben empezar a ver la disminución de la población como un objetivo, en lugar de como un impedimento al crecimiento económico.

En su libro *Energía en la encrucijada*[\[115\]](#), Vaclav Smil muestra la relación entre el consumo de energía per cápita y diversos índices de bienestar. Los datos parecen mostrar que el bienestar requiere al menos entre 50 y 70 GJ per cápita por año. A medida que el consumo por encima de este nivel se extiende ligeramente, también se extiende un sentido de bienestar, pero solamente hasta alrededor de

100 GJ per cápita, un “margen de seguridad” como si dijéramos. Es destacable, sin embargo, que por encima y más allá de este nivel de consumo, no hay aumento en la sensación de bienestar. De hecho cuanto más consumistas y ricos nos volvemos, menos contentos y satisfechos parecemos estar. Uno se pregunta si el esfuerzo necesario para extender la riqueza material y el consumo lleva incorporado las insatisfacciones en forma de pérdida de tiempo libre, presiones diarias añadidas, contacto familiar reducido, compromiso con la naturaleza y placeres personales. El consumo de energía de Norte América actualmente es de alrededor de 325 GJ por año. Usando estos indicadores como objetivos, y con una noción general de la cantidad total de energía que habría disponible a partir de las fuentes de energía renovables, debería ser posible establecer un objetivo para un tamaño de población y unos niveles de consumo que equilibrarían estos factores.

La conservación de la energía puede tomar dos formas fundamentales: restricciones y eficiencia. *Restricción* describe situaciones en las que los usos de energía simplemente se cortan (por ejemplo, podemos apagar las luces en las habitaciones cuando salimos de ellas). *Eficiencia* describe situaciones en las que se usa menos energía para producir un beneficio equivalente (un ejemplo relacionado sería el reemplazo de bombillas incandescentes con fluorescentes compactos o leds). Normalmente se prefiere la eficiencia, puesto que poca gente quiere abandonar beneficios tangibles, pero las ganancias en eficiencia están sujetas a la ley de rendimientos decrecientes (el primer diez por ciento de ganancia puede ser fácil y barato, el siguiente diez por ciento será algo más costoso, etc.) y hay siempre límites máximos a las posibles ganancias de eficiencia (es imposible alumbrar los hogares por la noche o transportar bienes con cero gasto de energía). Sin embargo, se podría conseguir mucho a corto plazo en eficiencia energética en todos los sectores de la economía. Las restricciones de uso es la solución más rápida y más barata a los problemas de suministro de energía. Dada la realidad de que el compromiso proactivo con la inevitable transición energética se ha retrasado demasiado, casi con toda seguridad tendrán que producirse restricciones (más que la eficiencia o el reemplazo con fuentes alternativas), especialmente en las naciones ricas. Pero incluso reconociendo esto, un esfuerzo proactivo será crucial porque una restricción planificada y gestionada llevará a una disrupción social mucho menor que con restricciones ad hoc, no planificadas, en forma de apagones eléctricos y crisis de combustible. La transición a una economía de estado estacionario requerirá una revisión de las teorías económicas y un rediseño de los sistemas financieros y monetarios[116] Estos esfuerzos casi con toda seguridad serán necesarios en cualquier caso si el mundo se recupera de la actual crisis económica. Una planificación realista del descenso de energía debe empezar en todos los niveles de la sociedad. Debemos identificar los bienes económicos esenciales (incluyendo obviamente alimentación, agua, cobijo, educación y sanidad) y desacoplarlos del consumo discrecional que se ha promovido en las últimas décadas simplemente para alimentar el crecimiento económico.

Las negociaciones de las Naciones Unidas sobre el cambio climático que han llevado hasta la cumbre del cima de Copenhague en diciembre de 2009, han presentado una oportunidad para que el mundo considere la centralidad de la conservación de la energía en el recorte de los gases de efecto invernadero, aunque esto apenas forme parte de la agenda oficial del clima de la ONU. Buena parte de la discusión política actual se centra de forma errónea en la expansión de las fuentes de energía renovables, con poca o ninguna consideración a sus límites ecológicos, económicos y prácticos. La eficiencia energética está recibiendo una atención creciente, pero debe ser vista como parte de una agenda de conservación clara dedicada a reducir la demanda global de energía.

Sorprendentemente, un reciente memorando de acuerdo EEUU-China sobre energía y clima listaba la conservación como su punto más importante entre las preocupaciones compartidas. Si las dos mayores consumidoras de energía del mundo creen de hecho que esta es su máxima prioridad, entonces es necesario que pase a primer plano en las discusiones globales sobre el clima. Sin embargo, el mandato

de las charlas de las Naciones Unidas sobre el clima no incluye un proceso oficial multilateral para cooperar en el descenso de energía. Los negociadores expresan cada vez más su preocupación sobre el tema del suministro de energía pero no tiene un foro internacional en el que discutirlo.

La comunidad de seguridad nacional parece ahora tomarse en serio las amenazas tanto sobre el cambio climático como sobre la vulnerabilidad en el suministro de energía. Esto podría establecer un nuevo contexto para esfuerzos internacionales post-Copenhague que traten las preocupaciones colectivas para evitar conflictos violentos sobre recursos energéticos en disminución y desastres climáticos.

* * *

Nuestro futuro energético está definido por los límites, y por la forma en que respondamos a estos límites. Los seres humanos pueden ciertamente vivir con límites: la mayor parte de la historia de la humanidad ha transcurrido bajo condiciones de relativa estasis en consumo de energía y actividad económica; es solo en los últimos dos siglos que hemos visto tasas espectaculares de crecimiento en actividad económica, consumo de energía y recursos, y población humana. Por tanto, la aceptación deliberada de límites no equivale al fin del mundo, sino simplemente a un retorno a un modelo más normal de existencia humana. Debemos empezar a considerar que los modelos económicos hiperconsumistas y altamente indulgentes del siglo XX fueron una ocasión única y no se pueden mantener. Si la transición energética es gestionada sabiamente, casi con toda seguridad será posible mantener, en un contexto de estado estacionario, muchos de los beneficios que nuestra especie ha disfrutado en las últimas décadas –mejor sanidad pública, mejor conocimiento de nosotros mismos y nuestro mundo, y un acceso más amplio a la información y a los bienes culturales como la música y el arte-. A medida que la sociedad adopte fuentes alternativas de energía, adoptará al mismo tiempo nuevas actitudes hacia el consumo, la movilidad y la población. De una forma u otra, la transición de los combustibles fósiles marcará un hito decisivo en la historia tan trascendental como la revolución agraria o la revolución industrial.

Referencias

[1] International Energy Agency, *Environment*, www.iea.org/Textbase/subjectqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4139

[2] Robert Ayres and Benjamin Warr, *The Economic Growth Engine: How Energy and Work Drive Material Prosperity*, Edward Elgar Publishing (2009).

[3] Douglas Reynolds, "Energy Grades and Historic Economic Growth," *Journal of Energy and Development*, Volumen 19, Número 2, (1994): 245-264.
www.hubbartpeak.com/Reynolds/EnergyGrades.htm

[4] *Tabla 1A*. Federal Energy Regulatory Commission, "Increasing Costs in Electric Markets," 2008, www.ferc.gov/legal/staffreports/06-19-08-cost-electric.pdf; "Getting Solar Electricity Installed Now Costs Less Than Ever Before," *AZ Building News*, 2009, www.azobuild.com/news.asp?newsID=6298; REN21, "Renewables 2007: Global Status Report"; EIA: www.iea.org/Textbase/npsum/ElecCostSUM.pdf; Marcel F. Williams, "The Cost of Non-Carbon Dioxide Polluting Technologies," <http://newpapyrusmagazine.blogspot.com/2008/10/cost-of-non-carbon-dioxide-polluting.html>

[5] *Tabla 1B*. Ibid.

[6] Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2006*,

www.eia.doe.gov/iea/wecbtu.html

[7] “An Overview of Landfill Gas Energy in the United States,” *U.S. Environmental Protection Agency*, (June 2008).

<http://epa.gov/lmop/docs/overview.pdf>

[8] Jochen Kreusel, “Wind Intermittent, Power Continuous,” *The ABB Review* 2009

www02.abb.com/global/gad/gad02077.nsf/lupLongContent/1D3D3A627F30E2F7C1256F500034FB96

[9] Douglas Reynolds, “Energy Grades and Historic Economic Growth,” *Journal of Energy and Development*, Volumen 19, Número 2, (1994): 245-264.

[10] Charles A. S. Hall, “Provisional Results from EROI Assessments,” *The Oil Drum*, (2008), www.theoil Drum.com/node/3810

[11] Adam J. Liska et al., “Improvements in Life Cycle Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions of Corn-Ethanol,” *Journal of Industrial Ecology*, Volume 13, Issue 1 (2009): 58-74.

www3.interscience.wiley.com/journal/121647166/abstract?

[12] Euan Mearns, “Should EROEI be the most important criterion our society uses to decide how it meets its energy needs?”,

The Oil Drum, <http://europe.theoil Drum.com/node/4428>

[13] Halbert, “EROI as a Reliable Indicator for Energy Source Development,” (no publicado, 2008).

[14] Para algunas excelentes sugerencias sobre estas líneas véase: Kenneth Mulder y Nathan John Hagens, “Energy Return on Investment: Toward a Consistent Framework,” *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, Vol. 37, No. 2 (March 2008). [http://ambio.allenpress.com/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1579%2F0044-7447\(2008\)37\[74%3AEROITA\]2.0.CO%3B2&ct=1&SESSID=31902f32baf52f3381eb8bf39f2e8e45](http://ambio.allenpress.com/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1579%2F0044-7447(2008)37[74%3AEROITA]2.0.CO%3B2&ct=1&SESSID=31902f32baf52f3381eb8bf39f2e8e45)

[15] Nate Hagens, “Advice to Pres. Obama (#2): Yes, We Can, But Will We?”, *The Oil Drum*, www.theoil Drum.com/node/4957#more

[16] *Diagrama 2. “Gráfico de globo”*. Charles Hall, “Provisional Results from EROI Assessments,” *The Oil Drum*,

www.theoil Drum.com/node/3810

[17] Charles A. S. Hall, six part series of posts on EROI analysis, *The Oil Drum*, 2008,

www.theoil Drum.com/node/3786,

www.theoil Drum.com/node/3810 www.theoil Drum.com/node/3839, www.theoil Drum.com/node/3877

www.theoil Drum.com/node/3910, www.theoil Drum.com/node/3949

[18] EIA, *Table 11.1 World Primary Energy Production by Source, 1970-2006*.

<http://www.eia.doe.gov/aer/txt/ptb1101.html>

[19] EIA, *Recent Petroleum Consumption Barrels Per Day*,

www.eia.doe.gov/emeu/international/oilconsumption.html

[20] David Pimentel and Marcia Pimentel, *Food, Energy and Society*, Third Ed. (CRC Press, 2008).

[21] 21. EIA, *Voluntary Reporting of Greenhouse Gases Program*

www.eia.doe.gov/oiaf/1605/coefficients.html

[22] Michael T. Klare, *Resource Wars: The New Landscape of Global Conflict* (New York: Owl Books, 2002).

[23] Nathan Gagnon, Charles A. Hall, y Lysle Brinker, “A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production.” *Energies* Vol. 2 No. 3, July 13, 2009.

www.mdpi.com/1996-1073/2/3/490.

[24] Oilwatch Monthly January 2009, *The Oil Drum*, www.theoil Drum.com/tag/oilwatch

[25] EIA, *International Energy Annual 2006, Net Generation by Energy Source* (2007), *U.S. Energy Consumption by Energy Source* (2006) www.eia.doe.gov/

[26] Charles Hall et al, *Alternative Fuels Dilemma*, no publicado.

[27] Ibid.

[28] False Hope: Why Carbon Capture and Storage Won't Save the Planet, Greenpeace, (May 2008),

www.greenpeace.org/raw/content/usa/press-center/reports4/false-hope-why-carbon-capture.pdf; J.C. Abanades et al., *Summary for Policymakers in IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, (B. Metz et al., Editors. 2005, Cambridge University Press: Cambridge, U.K.).

[29] EIA, *World Proved Reserves of Oil and Natural Gas, Most Recent Estimates* www.eia.doe.gov/emeu/international/reserves.html

[30] *Alternative Fuels Dilemma*, no publicado.

[31] WEC2007 *Survey of Energy Resources*, 272; REN21, “Renewables 2007: Global Status Report,” EIA, *World Net Generation of Electricity by Type*, 2005.

[32] WEC, *2007 Survey of Energy Resources*, 235; EIA, *U.S. Nuclear Generation of Electricity*, 2007; Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), “Renewables 2007: Global Status Report,” 9, www.ren21.net/

[33] Energy Watch Group, *Uranium Resources and Nuclear Energy*, 2006.

[34] Robert Powers y Charles Hall, “The Energy Return of Nuclear Power,” Appendix F, *The Oil Drum*, 2008, www.theoil drum.com/node/3877

[35] WEC2007 *Survey of Energy Resources*, 333.

[36] REN21, “Renewables 2007: Global Status Report,” www.ren21.net

[37] “FAO Facts & Figures,” *Food and Agriculture Association of the United Nations*, www.fao.org/forestry/30515/en/

[38] WEC2007 *Survey of Energy Resources*, 333.

[39] “Net Greenhouse Gas Emissions from Biomass and Other Renewable Generators, *U.S.A Biomass*, www.usabiomass.org/

[40] U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy Biomass Program: *Technologies*, www1.eere.energy.gov/biomass/processing_conversion.html

[41] “Energy from Biomass,” *bioenergie.de*, www.bio-energie.de/cms35/Biomass.393.0.html

[42] David Ehrlich, “Putting Biogas into the Pipelines,” earth2tech.com, <http://earth2tech.com/2009/02/03/putting-biogas-into-the-pipelines/> Green’ a Scenario for 2020,” *nationalgrid.com*, www.nationalgrid.com/NR/rdonlyres/554D4B87-75E2-4AC7-B222-6B40836249B5/26663/GoneGreenfor2020.pdf

[43] REN21, “Renewables 2007: Global Status Report,” www.ren21.net

[44] Ibid.

[45] WEC2007 *Survey of Energy Resources*, 479; Joe Provey, “Wind: Embracing America’s Fastest-Growing Form of Renewable Energy,” www.alternet.org/environment/118047/wind:_embracing_america's_fastest-growing_form_of_renewable_energy/

[46] Christina L. Archer, Mark Z. Jacobson, “Evaluation of Global Wind Power,” *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, www.stanford.edu/group/efmh/winds/global_winds.html

[47] EIA, “Technology Choices for New U.S. Generating Capacity: Levelized Cost Calculations,” *International Energy Outlook 2006*, www.eia.doe.gov/oiaf/archive/ieo06/special_topics.html

[48] Ida Kubisewski y Cutler Cleveland, “Energy from Wind: A Discussion of the EROI Research,” *The Oil Drum*, www.theoil drum.com/node/1863

[49] WEC2007 *Survey of Energy Resources*, 381; Ken Zweibel, James Mason and Vasilis Fthenakis, “A Solar Grand Plan,” *Scientific American*, December 2007, www.sciam.com/article.cfm?id=a-solar-grand-plan

[50] European Photovoltaic Technology Platform, www.eupvplatform.org/index.php?id=47

[51] Erik A. Alsema y Mariska J. de Wild-Scholten, “Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production,” *13th CIRP Intern. Conf. on Life Cycle Engineering*, 2006,

www.ecn.nl/docs/library/report/2006/rx06041.pdf

[52] Charles A. S. Hall, "The Energy Return of (Industrial) Solar – Passive Solar, PV, Wind and Hydro," Appendix G-2:

Photovoltaics, *The Oil Drum*, www.theoil Drum.com/node/3910

[53] Graham Jesmer, "The U.S. Utility-scale Solar Picture," *Renewable Energy World.com*, www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/02/the-us-utility-scale-solar-picture

[54] Ibid.; Tom Standing, "Arizona Solar Power Project Calculations," *The Oil Drum*, www.theoil Drum.com/node/4911#more

[55] "Andasol 1 Goes Into Operation," *Renewable Energy World.com*, November 6, 2008.

www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/11/andasol-1-goes-into-operation-54019

[56] Kallistia Giermek, "The Energy Return of (Industrial) Solar – Passive Solar, PV, Wind and Hydro," Appendix G-1: Passive

Solar, *The Oil Drum*, www.theoil Drum.com/node/3910

[57] U.K. Timber Frame Association, "Timber Frame takes the Passivhaus tour," *Buildingtalk.com*, www.buildingtalk.com/news/tim/tim140.html

[58] Kallistia Giermek, "The Energy Return of (Industrial) Solar – Passive Solar, PV, Wind and Hydro," *The Oil Drum*, www.theoil Drum.com/node/3910

[59] REN21, "Renewables 2007: Global Status Report," www.ren21.net

[60] Patrick Hughes, *Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps: Market Status, Barriers to Adoption and Actions to Overcome Barriers* (Oak Ridge National Laboratory ORNL-232, 2008).

[61] Daniel Halloran, Geothermal (SUNY-ESF, Syracuse NY), online 2008
www.theoil Drum.com/node/3949)

[62] Massachusetts Institute of Technology, *The Future of Geothermal Energy* (Idaho National Laboratory, 2006),

http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf

[63] EIA, *Electricity Net Generation From Renewable Energy by Energy Use Sector and Energy Source*, 2007, www.eia.doe.gov/cneaf/alternate/page/renew_energy_consump/table3.html; Elisabeth Lacoste and Phillippe Chalmin, *From Waste to Resource*, Veolia Environmental Services, 2006.

[64] U.S. Environmental Protection Agency, *An Overview of Landfill Gas Energy in the United States*, June 2008,

www.epa.gov/lmop/docs/overview.pdf

[65] Statistics, *Renewable Fuels Association*, www.ethanolrfa.org/industry/statistics/

[66] EIA, *Petroleum Basic Statistics*, www.eia.doe.gov/basics/quickoil.html

[67] Jack Santa Barbara, *The False Promise of Biofuels*. San Francisco: International Forum on Globalization, and Institute for Policy Studies, 2007.

[68] "The Truth about Ethanol," *Union of Concerned Scientists*,

www.ucsusa.org/clean_vehicles/technologies_and_fuels/biofuels/thetruth-about-ethanol.html

[69] Ibid.

[70] "Mexicans stage tortilla protest," *BBC News online*,

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/6319093.stm>

[71] Joseph Fargione, Jason Hill, David Tilman, Stephen Polasky and Peter Hawthorne, "Land Clearing and the Biofuel Debt,"

Science, February 7, 2008, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1152747

[72] Richard Lance Christie, "The Renewable Deal: Chapter 5: Biofuels," *Earth Restoration Portal*, 2008, www.manyone.net/EarthRestorationPortal/articles/view/131998/?topic=9481

[73] "The Effect of Natural Gradients on the Net Energy Profits from Corn Ethanol," *The Oil Drum*,

<http://netenergy.theoil Drum.com/node/4910#more>

[74]David Pimentel and Tad W. Patzek, "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower," *Natural Resources Research*, Volume 14:1, 2005. ; Adam Liska et al., "Improvements in Life Cycle Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions of Corn Ethanol," *J. Industrial Ecology*, Volume 13:1, 2009.

[75]Charles A. S. Hall, in comments on "Provisional Results from EROEI Assessments," *The Oil Drum*,
www.theoil Drum.com/node/3810

[76]"Biofuels for Transportation: Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century," *Worldwatch Institute*, 2006,
www.worldwatch.org/system/files/EBF008_1.pdf

[77]REN21, "Renewables 2007: Global Status Report," <http://www.ren21.net>

[78]Richard Lance Christie, "The Renewable Deal: Chapter 5: Biofuels," *Earth Restoration Portal*, 2008, www.manyone.net/EarthRestorationPortal/articles/view/131998/?topic=9481

[79]Ibid.

[80]Rhett A. Butler, "Orangutan should become symbol of palm-oil opposition," *Mongabay.com*, http://news.mongabay.com/2008/0102-palm_oil.html

[81]Jason Hill, Erik Nelson, David Tilman, Stephen Polasky and Douglas Tiffany, "Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, July 25, 2006, Vol 103. [www.pnas.org/content/103/30/11206.abstract?](http://www.pnas.org/content/103/30/11206.abstract)

[82]. "Soybean biodiesel has higher net energy benefit than corn ethanol—study," *Mongabay.com*, <http://news.mongabay.com/2006/0711-umn.html>

[83]"Biodiesel proven to have a significantly positive net energy ratio," *Biodiesel Now*, www.biodieselnow.com/blogs/general_biodiesel/archive/2008/02/07/biodiesel-proven-to-have-a-significant-positive-net-energy-ratio.aspx

[84]"Biofuels for Transportation," *Worldwatch Institute*, 2006.

[85]Michael Briggs, "Widespread Biodiesel Production from Algae," *UNH Biodiesel Group* (University of New Hampshire, 2004), www.unh.edu/p2/biodiesel/article_alge.html

[86]M. C. Herweyer, A. Gupta, "Unconventional Oil: Tar Sands and Shale Oil," Appendix D, *The Oil Drum*, 2008, www.theoil Drum.com/node/3839

[87]World Energy Council (WEC), 2007 *Survey of Energy Resources*, 93,
www.worldenergy.org/publications/survey_of_energy_resources_2007/default.asp

[88]A. R. Brandt, "Net energy and greenhouse gas emissions analysis of synthetic crude oil produced from Green River oil shale," Energy and Resources Group Working Paper (University of California, Berkeley, 2006).

[89]REN21, "Renewables 2007: Global Status Report," www.ren21.net

[90]. "Energy Source: Tidal Power," *The Pembina Institute*, <http://re.pembina.org/sources/tidal>

[91]World Energy Council, 1993.

[92]WEC 2007 *Survey of Energy Resources*, 543.

[93]Daniel Halloran, Wave Energy: Potential, EROI, and Social and Environmental Impacts (SUNY-ESF, Syracuse NY), online 2008. www.theoil Drum.com/node/3949

[94] *Tabla 2*. Charles Hall, "Provisional Results Summary, Imported Oil, Natural Gas," *The Oil Drum*, (2008); WEC 2007 *Survey of Energy Resources*; EIA, *World Net Generation of Electricity by Type*; IAEA, "Nuclear's Great Expectations,"
www.iaea.org/NewsCenter/News/2008/np2008.html; Tom Mancini, "Concentrating Solar Power," Sandia National Laboratories,
http://files.eesi.org/Mancini_CSP_051608.pdf; Worldwide electricity production from renewable energy

sources,” www.energiesrenouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/Chapitre01ENG.pdf

[95] *Tabla 3. EIA, International Energy Outlook 2008*; WEC, 2007 *Survey of Energy Resources*; U.S.GS, “Geology and Resources of Some World Oil-Shale Deposits”; FAO, “The State of Food and Agriculture 2008”; Matt Johnston y Tracey Holloway, “A Global Comparison of National Biodiesel Production Potentials,” *Environmental Science and Technology*, (Volumen 41, 2007).

[96] Jeremy Rifkin, *The Hydrogen Economy*, (New York: Tarcher, 2002). Joseph Romm, *The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*, (Island Press, 2005).

[97] Some Thoughts on the Obama Energy Agenda from the Perspective of Net Energy, *The Oil Drum*, (2009), <http://netenergy.theoil Drum.com/node/5073>

[98] Anne Trafton, “‘Major discovery’ from MIT primed to unleash solar revolution,” MIT News, Massachusetts Institute of Technology (2008), <http://web.mit.edu/newsoffice/2008/oxygen-0731.html>

[99] Kurt Zenz House y Alex Johnson, “The Limits of Energy Storage Technology,” *Bulletin of the Atomic Scientists* (January 2009). <http://thebulletin.org/web-edition/columnists/kurt-zenz-house/the-limits-of-energy-storage-technology>

[100] Rebecca Smith, “New Grid for Renewable Energy Could Be Costly,” *The Wall Street Journal* (9 de febrero de 2009). <http://online.wsj.com/article/SB123414242155761829.html>

[101] Ian Bowles, “Home-Grown Power,” *New York Times*, March 6, 2009. www.nytimes.com/2009/03/07/opinion/07bowles.html?em

[102] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007 – Mitigation of Climate Change*, Working Group III Fourth

[103] Arjun Makhijani, “Carbon-Free and Nuclear-Free: A Roadmap for U.S. Energy Policy,” *Science for Democratic Action*, Institute for Energy and Environmental Research (August 2007). www.ieer.org/sdfiles/15-1.pdf

[104] Rocky Mountain Institute, <http://ert.rmi.org/research>

[105] Ted Trainer, *Renewable Energy Can Not Sustain a Consumer Society*, (Dordrecht NL: Springer, 2007).

[106] Praveen Ghanta, “How Much Energy Do We Need?,” post to *True Cost*, February 19, 2009, <http://truecost.wordpress.com/2009/02/19/how-much-energy-do-we-need/>

[107] *Tabla 4. EIA, International Energy Statistics* (online 2008), <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/contents.html>

[108] Richard Gilbert, *Transport Revolutions: Moving People and Freight Without Oil* (Earthscan, 2008).

[109] Passive House Institute, “Definition of Passive Houses” www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/passivehouse_definition.html

[110] Ben Block, “Water Efficiency Key to Saving Energy, Expert Says,” *Worldwatch Institute* website, February 11, 2009 www.worldwatch.org/node/6007 California Energy Commission, *California’s Water-Energy Relationship*, CEC-700-2005-011-SF (November 2005) www.energy.ca.gov/2005publications/CEC-700-2005-011/CEC-700-2005-011-SF.PDF

[111] Jason Bradford, “Relocalization: A Strategic Response to Climate Change and Peak Oil,” post to *The Oil Drum*, June 6, 2007, www.theoil Drum.com/node/2598

[112] Richard Heinberg y Michael Bomford, *The Food and Agriculture Transition*. Sebastopol, CA: Post-Carbon Institute and The Soil Association, 2009.

[113] Para una simulación de cómo podría funcionar esto:, véase Peter Victor, *Managing without Growth: Slower by Design, Not Disaster*. London: Edward Elgar Publications. 2008.

[114] Véase David Wann, *Simple Prosperity: Finding Real Wealth in a Sustainable Lifestyle* (New York:

St. Martin's, 2007); la película documental "The Power of Community: How Cuba Survived Peak Oil," www.powerofcommunity.org/cm/index.php; y el movimiento de Comunidades en Transición, www.transitiontowns.org

[115] Vaclav Smil, *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.

[116] Herman Daly y Josh Farley, *Ecological Economics: Principles and Applications*, (Island Press, 2004) capítulo 14.

BIBLIOGRAFÍA

Ayres, Robert, and Benjamin Warr. *The Economic Growth Engine: How Energy and Work Drive Material Prosperity*. Cheltenham, U.K.:

Edward Elgar Publishing, 2009.

Brown, Lester. *Plan B 3.0: Mobilizing to Save Civilization*. New York: Norton, 2009

Campbell, Colin, and Siobhan Heapes. *An Atlas of Oil and Gas Depletion*. Yorkshire, U.K.: Jeremy Mills Publishing, 2008.

Conkin, Paul K. *The State of the Earth: Environmental Challenges on the Road to 2100*. Kentucky: University of Kentucky Press, 2007.

Cook, Earl. *Man, Energy, Society*. San Francisco: W. H. Freeman, 1976.

Cottrell, Fred. *Energy and Society: The Relation Between Energy, Social Change, and Economic Development*. New York: McGraw-Hill, 1955.

Daly, Herman. *Beyond Growth*. Boston: Beacon Press, 1996.

_____, and Josh Farley, *Ecological Economics: Principles and Applications*. Washington, D.C.: Island Press, 2004.

Deffeyes, Kenneth S. *Beyond Oil: The View from Hubbert's Peak*. New York: Hill and Wang, 2005.

Dematteis, Lou, and Kayana Szymczak. *Crude Reflections: Oil, Ruin and Resistance in the Amazon Rainforest*. San Francisco: City

Lights Books. 2008.

Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2006.

Greenblatt, Jeffery, et al., *Clean Energy 2030: Google's Proposal for Reducing U.S. Dependence on Fossil Fuels*. Palo Alto: Google, 2008.

<http://knol.google.com/k/-/15x31uzlqeo5n/1#>

Hall, Charles A. S. "Provisional Results from EROEI Assessments," *The Oil Drum*, 2008.

www.theoil drum.com/node/3810

_____, EROI Analysis. (Six-part series of posts.) *The Oil Drum*, 2008,

www.theoil drum.com/node/3786,

www.theoil drum.com/node/3810; www.theoil drum.com/node/3839, www.theoil drum.com/node/3877;

www.theoil drum.com/node/3910, www.theoil drum.com/node/3949

Hardin, Garrett. *Living Within Limits: Ecology, Economics, and Population Taboos*. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 1993.

Hayden, Howard C. *The Solar Fraud: Why Solar Energy Won't Run the World*, second ed. Pueblo West, CO: Vales Lake Publishing, 2004.

Heinberg, Richard. *Powerdown: Options and Actions for a Post-Carbon World*. Gabriola Island, B.C.: New Society, 2004.

_____. *The Party's Over: Oil, War and the Fate of Industrial Societies*, second ed. Gabriola Island, B.C.: New Society, 2005.

_____. *The Oil Depletion Protocol: A Plan to Avert Oil Wars, Terrorism and Economic Collapse*.

Gabriola Island, B.C.:New Society, 2006.

_____ and Michael Bomford. *The Food and Agriculture Transition*. Sebastopol, CA: Post-Carbon Institute and The Soil Association, 2009.

_____. *Blackout: Coal, Climate and the Last Energy Crisis*. Gabriola Island, B.C.: New Society, 2005.

Henson, Robert. *The Rough Guide to Climate Change*. London: Penguin, 2007.

Howe, John G. *The End of Fossil Energy*, third ed. Waterford, ME: McIntyre, 2006.

Klare, Michael T. *Resource Wars: The New Landscape of Global Conflict*. New York: Owl Books, 2002.

_____. *Rising Powers, Shrinking Planet: The New Geopolitics of Energy*. New York: Metropolitan, 2008.

Lovins, Amory B. *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*. New York: Friends of the Earth, 1977.

_____. *Winning the Oil Endgame*. Colorado: Rocky Mountain Institute, 2005.

Makhijani, Arjun. *Carbon-Free and Nuclear-Free: A Roadmap for U.S. Energy Policy*. Muskegon, MI: RDR Books, 2007.

Mander, Jerry, and John Cavanagh. *Alternatives to Economic Globalization: A Better World Is Possible*. San Francisco: Berrett Koehler. 2004.

Meadows, Donella H., Jorgen Randers, and Dennis Meadows. *Limits to Growth: The 30-Year Update*. Vermont: Chelsea Green, 2005.

Mobbs, Paul. *Energy Beyond Oil*. Leicester, U.K.: Matador Publishing, 2005.

Murphy, Pat. *Plan C: Community survival Strategies for Peak Oil and Climate Change*. Gabriola Island, B.C.: New Society, 2008.

Pahl, Greg. *The Citizen-Powered Energy Handbook: Community Solutions to a Global Crisis*. White River Junction, VT: Chelsea Green, 2007.

Pernick, Ron, and Clint Wilder. *The Clean Tech Revolution: The Next Big Growth and Investment Opportunity*. New York: Collins, 2007.

Pickens, T. Boone. *The Pickens Energy Plan*. www.pickensplan.com/theplan/

Pimentel, David, and Marcia Pimentel. *Food, Energy and Society*, Third Edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

Reynolds, Douglas. "Energy Grades and Historic Economic Growth." *Journal of Energy and Development*, Vol. 19, No. 2 (1994).

Rifkin, Jeremy. *The Hydrogen Economy*. New York: Tarcher, 2002.

Romm, Joseph. *The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*. Washington, D.C.: Island Press, 2005.

Santa Barbara, Jack. *The False Promise of Biofuels*. San Francisco: International Forum on Globalization, and Institute for Policy Studies, 2007.

Smil, Vaclav. *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.

Thomas, Larry. *Coal Geology*. West Sussex, U.K.: Wiley, 2002.

Trainer, Ted. *Renewable Energy Cannot Sustain a Consumer Society*. Dordrecht, The Netherlands: 2007.

Victor, Peter. *Managing Without Growth: Slower by Design, Not Disaster*. London: Edward Elgar Publications, 2008.

World Energy Council. *2007 Survey of Energy Resources*. London, 2007.

Youngquist, Walter. *Geodestinies: The Inevitable Control of Earth Resources over Nations and Individuals*. Portland, OR: National Book Company, 1997.

El Foro Internacional sobre la Globalización (FIG) fundado en 1993, es una alianza y organización internacional de investigación, educación y acción, compuesta de destacados especialistas, economistas y activistas de todos los continentes. El FIG se ha centrado en los efectos de una economía globalizada sobre el medio ambiente, el poder político, la justicia social y la equidad dentro y entre las naciones. Expresamos esta misión mediante publicaciones, seminarios públicos y privados, grandes encuentros públicos (com el Seattle en 1999 y otros lugares), y la organización del movimiento hacia sistemas económicos alternativos. En 2004 iniciamos un trabajo sobre la Triple Crisis, albergando una serie de eventos estratégicos internacionales y sesiones públicas sobre el cambio climático, el pico del petróleo y el agotamiento global de los recursos. Estamos ahora ayudando a coordinar reuniones internacionales sobre estos temas. Esta publicación sobre la “energía neta” es el n° 4 de nuestra colección Soluciones Falsas.

1009 General Kennedy Ave. , #2, San Francisco CA 94129

Tel (415) 561-7650 email: ifg@ifg.org www.ifg.org

POST CARBON INSTITUTE es un equipo de líderes del pensamiento cuya misión colectiva es dirigir la inmediata transición a un mundo resiliente, equitativo y sostenible. Ofrecemos una visión unificada y una comprensión de los retos –y las respuestas necesarias- a los temas económicos, energéticos y medioambientales más importantes a los que se enfrenta hoy el mundo. Y proporcionamos una hoja de ruta para esta transición proporcionando a los individuos, comunidades, empresas y gobiernos la información y los recursos que necesitan para comprender y emprender acciones.

500 N. Main St., Suite 100, Sebastopol, CA 95472

Tel (707) 823-8700 Fax (866) 797-5820 www.postcarbon.org

Editorial Notes

[Una breve historia sobre los combustibles fósiles](#) (video) - Post Carbon Institute

[¿Quién acabó el crecimiento económico?](#) (video) - Post Carbon Institute

[La transición alimentaria y agrícola](#) - Richard Heinberg and Michael Bomford

[El fin del Crecimiento: Introducción](#) - Richard Heinberg

[China o los Estados Unidos: ¿Cuál será la nación que mantenga liderazgo?](#) - Richard Heinberg