



CONCEPTOS
Y FENÓMENOS
FUNDAMENTALES
DE NUESTRO
TIEMPO

UNAM

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOCIALES

TRANSICIONES ENERGÉTICAS:
AGOTAMIENTO Y RENOVACIÓN DE LOS
RECURSOS ENERGÉTICOS
FRANCISCO AGUAYO AYALA

Mayo 2012

**TRANSICIONES ENERGÉTICAS:
AGOTAMIENTO Y RENOVACIÓN DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS**
Por Francisco Aguayo Ayala

Contenido

Introducción.....	2
I: Expansión.....	3
II: Fósiles	4
III. Transiciones.....	7
4. Renovables: tecnologías y regímenes institucionales.....	10
5. Conclusión.....	14

Introducción

Los sistemas de generación y uso de la energía forman parte fundamental de las estructuras de reproducción de la sociedad. La transformación de las formas de utilización de la energía modifica, por tanto, partes importantes de la vida económica y social. De forma paralela, los sistemas energéticos constituyen uno de los vínculos más importantes de articulación entre la dinámica social y el medio ambiente. Estos sistemas enfrentan actualmente una crisis de múltiples niveles: agotamiento de recursos fósiles convencionales, emisiones que calientan la atmósfera y la necesidad de una transición hacia sistemas más pequeños.

Los sistemas energéticos actuales constituyen como enormes cadenas de producción y consumo que, desde una base de recursos naturales, alimentan todas las actividades económicas por medio de extensas infraestructuras físicas, gigantescos circuitos comerciales y poderosos amarres financieros. Este nivel de penetración estructural hace que los sistemas económicos y políticos sean altamente sensibles a la escasez de recursos energéticos. El control estratégico de estos recursos ha sido un argumento central de las política internacional y militar de las grandes potencias.

La emergencia y expansión de nuevos sistemas energéticos y el reemplazo de los anteriores es un proceso de muy larga duración, que no responde a movimientos de corto plazo en los precios de los insumos debido, entre otras cosas, a su elevada

intensidad de capital fijo¹. Este proceso de *destrucción-creativa* está más bien asociado con la emergencia de nuevas y más eficientes formas de conversión y utilización de la energía y con ciclos largos de acumulación capitalista, más que a la escasez directa de recursos. Cada fase de expansión ha estado asociada a la convergencia entre nuevos combustibles y usos de la energía, nuevos materiales y conjuntos de nuevas industrias, que entran en funcionamiento a través de nuevas formas de organización de la producción y de regulación de la distribución y el consumo.

Aparejado con la debacle financiera y el deterioro ambiental, el sistema energético global se encuentra en un momento crítico. Los límites físicos a la expansión del consumo energético son ahora más visibles que nunca, tanto por el agotamiento de los recursos energéticos convencionales como por la perturbación que los usos de la energía producen en la atmósfera. La inercia acumulada por el sistema se enfrenta así a un conjunto de futuros técnica y socialmente posibles, pero cuya definición depende del emplazamiento de nuevas formas de regulación y nuevos equilibrios políticos.

I: Expansión

La tierra es básicamente un sistema cerrado, con excepción de la energía que recibe del sol. La energía solar mueve el sistema climático y produce las condiciones para la existencia y reproducción de la vida. En términos de los sistemas vivos, la producción de energía primaria la realizan las plantas. A través de la fotosíntesis, las moléculas de clorofila transforman la energía solar en energía química sintetizando glucosa y otros compuestos orgánicos complejos. Los organismos consumidores, entre ellos los humanos, absorben mediante la digestión la energía previamente almacenada químicamente por las plantas o indirectamente alimentándose de otros animales.

Sobre esta de transferencias de energía los ecosistemas del planeta han evolucionado hasta convertirse en estructuras muy finas y complejas, que mantienen su equilibrio gracias a variaciones interdependientes de las poblaciones de las especies del ecosistema. Los seres humanos, sin embargo, han sido capaces de traspasar las barreras naturales establecidas por esos equilibrios, mediante el desvío y control de procesos naturales para su beneficio, el desarrollo de tecnología y de la división social del trabajo, la producción combinada de ecosistemas y la explotación de reservas

¹ Infraestructuras e instalaciones que requieren un elevado volumen de capital invertido inicial, tienen una lenta tasa de circulación del capital, economías de red (y o se basan en sistemas acoplados cuya sustitución requiere llevar a cabo múltiples adaptaciones, .

energéticas naturales.² Estas estrategias permitieron a las sociedades humanas sobrepasar los límites establecidos por la capacidad de sustentación de sus respectivos ecosistemas. Sin embargo, la ideología del crecimiento ilimitado ha enfilado esas mismas estrategias en la dirección de un colapso no sólo económico, sino ecológico mayúsculo.

El consumo energético promedio del ser humano sigue, junto con el de su población, una trayectoria exponencial. Hasta antes de la revolución industrial, el consumo energético de la humanidad se basó en el uso de biomasa tradicional, limitado en última instancia por la capacidad de conversión de energía solar por los productores primarios (las plantas). La revolución neolítica representó una enorme transformación en el consumo energético con respecto a las sociedades basadas en la caza y recolección. Con la agricultura y la aparición de las primeras ciudades alrededor del año 5000 A.C. se duplicó el consumo de energía, desde un nivel de subsistencia (unas 2,000 kilocalorías diarias o 3 Gigajoules el año) hasta unos 6 Gigajoules (GJ) al año. A su vez, la utilización de animales de tiro, entre 3000 y 3500 A.C. habría permitido aumentar el consumo energético humano hasta unos 13 GJ para el año 1000 A.C. La población humana en el planeta no pasaba, en esos momentos, de unos 50 millones de personas. La introducción de mejoras técnicas en la agricultura (arado, yuntas, arneses, irrigación, etc.), el refinamiento de las técnicas de combustión, así como el paulatino aprovechamiento de fuentes de energía hidráulica, viento y fuerza animal, esenciales para procesar cosechas concentradas, permitirían duplicar de nuevo el consumo de energía en los siguientes dos mil años. Así, para el año 1700 el consumo per capita de energía se habría escalado hasta unos 38 GJ anuales y la población alcanzaba ya los 700 millones de habitantes. La revolución industrial impulsó el consumo anual a 56 GJ en 1900 y de ahí a cerca de 80 GJ hacia finales del siglo XX. Así, desde la revolución neolítica el consumo energético per capita creció 13 veces, mientras que la población lo hizo 1,200 veces.³ Dada la trayectoria de ambos factores del consumo energético total de la humanidad (consumo promedio y población), el resultado es una expansión superexponencial tanto del uso como del impacto energético global. A partir de la revolución neolítica, el consumo energético humano anual habría aumentado más de 15,000 veces. Esta dinámica de crecimiento está acompañada de profundas desigualdades nacionales y

² Véase Catton, 1982, cap. 1.

³ Las estimaciones sobre el consumo de energía provienen de Simmons (1989, p. 23-24) y Smil (1991, p. 200); las de población, de Ponting (1991, p. 90). Como referencia, el contenido energético de un barril de petróleo es de alrededor de 6 GJ.

sociales ocultas tras los promedios. La distribución del consumo energético en el planeta comprende un rango enorme, que va de los 900 millones de personas cuyo “déficit energético” se traduce en hambruna crónica⁴, a niveles de derroche suntuario que incluye Hummers o pistas de hielo en el desierto.

La revolución industrial produjo un conjunto de nuevas tecnologías y patrones de consumo que permitieron el acceso, la transformación y la utilización de reservas energéticas de producción orgánica acumulada a lo largo de millones de años en combustibles fósiles. A su vez, el orden económico y social de la moderna sociedad capitalista, produjo el marco institucional y los incentivos necesarios para la explotación masiva y creciente de esas reservas⁵. Este tránsito del uso de *flujos* a la explotación acelerada de *acervos* energéticos marca un punto de quiebre en el uso humano de la energía y en la relación social con el medio ambiente. Por un lado, la dinámica de crecimiento económico basada en la acumulación de capital, que no puede ser otra que la de un incesante crecimiento, quedó anclada a la dependencia de un suministro creciente de energía barata en forma de combustibles de muy alta densidad energética, volviéndose muy vulnerable a la cantidad y costos de los recursos energéticos. Por el otro, las emisiones y desechos tóxicos de la combustión masiva de energía fósil se elevó en varios órdenes de magnitud, generando enormes daños a la salud de personas y ecosistemas. Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y otros gases de efecto invernadero derivados del uso de energía comenzaron a alterar el ciclo global del carbono, cuyos efectos acumulados sólo se comenzaron a apreciar a finales del siglo XX.

II: Fósiles

La energía conforma el rubro individual más importante de la economía real y la mayor parte de la que se consume es energía fósil (ver Gráfica 1). En particular, la energía de origen fósil es el comercio más grande y lucrativo del mundo y las empresas que la generan son las más grandes del planeta. Las fuentes de energía fósil tienen una muy alta densidad, pueden proporcionar un flujo de energía con intensidad constante, son de

⁴ Según FAO (2010), el número de personas con desnutrición y riesgo alimentario en el mundo habría aumentado en 100 millones de personas, por efecto de la crisis económica global.

⁵ Como hizo notar ya en 1885 el físico Rudolf Clausius, si bien es válido (ahora diríamos sustentable) consumir tanta energía como se puede producir en el mismo periodo, al consumir las reservas de carbón la sociedad se comportaba como quien dilapida una herencia (citado en Martínez-Alier y Schlüpman, 1991, pp. 96-97). Clausius trató principalmente sobre el carbón y no pudo anticipar la aparición de otras fuentes fósiles como el petróleo y el gas, pero su argumento sigue siendo válido para los combustibles fósiles en general.

fácil transportación y tienen una gran flexibilidad de aplicaciones. Estas características, como observa Altvater (2007), se acoplan con precisión a las exigencias de la acumulación global de capital, facilitando la compactación espacial y temporal del proceso de producción-circulación-consumo, creando una dependencia profunda entre y la energía fósil y la lógica de la acumulación capitalista.

A partir de la crisis del petróleo en 1973 en el mundo desarrollado se iniciaron algunos esfuerzos por diversificar las fuentes de energía. Aunque las alternativas tecnológicas se han multiplicado y muchas de ellas han madurado de forma muy importante en términos de estabilidad tecnológica y costos, la composición porcentual por tipo de fuente ha permanecido prácticamente intacta (con una pequeña sustitución de petróleo por gas natural). Desde aquél año, la participación del petróleo en la energía primaria global se redujo de 46 a 35% (mismo terreno que avanzaron el gas natural y la energía nuclear). Actualmente, las energías fósiles dominan con un 80% las fuentes primarias, seguidas de las renovables con 13% (de las cuales la mayor parte consiste en biomasa que se consume en forma de madera en los países pobres) y la nuclear con un 6%. A pesar de esta disminución relativa, desde 1973 la producción y consumo global de crudo aumentó un 50%, de 56 a 85 millones de barriles diarios⁶. Más aún, aunque el petróleo constituye actualmente sólo el 40% de la energía primaria, proporciona el 90% de la energía del sector transporte. Puede afirmarse que la economía global no se ha vuelto menos dependiente del petróleo, sino que ha aumentado su dependencia de otras fuentes de energía.

Existe una intensa (y permanente) discusión acerca del tamaño y duración de las reservas de hidrocarburos. Las estimaciones más generales sobre la duración de las reservas de hidrocarburos indican que, de mantenerse las tasas de consumo actual, las reservas probadas de petróleo durarán unos 40 años, las de gas natural entre 50 y 70 años, y las de carbón entre 140 y 180 años.⁷ Si se observa la razón entre reservas probadas y producción a lo largo del tiempo, puede verificarse que, en el caso del petróleo, la duración de las reservas se ha mantenido alrededor de 40 años al menos desde 1986^{8 9}. El volumen de reservas de petróleo se haya duplicado entre 1980 y 2007 (AIE, 2008).

⁶ BP (2010).

⁷ Review of Energy World Statistics, 2010; AIE, 2008; Lior, 2008.

⁸ Esto es así porque el término “reservas de hidrocarburos” no se refiere precisamente a la cantidad geológica existente de un recurso, sino a la cantidad que puede extraerse bajo ciertas condiciones. Así, las reservas literalmente se “producen” mediante las actividades de prospección, exploración, desarrollo y

En los últimos años la discusión sobre las reservas de petróleo se ha centrado alrededor de la noción de “pico” o “sima”, es decir, el punto históricamente más alto de producción anual, a partir del cual la producción comienza a declinar, con referencia a la metodología de Hubbert.¹⁰ Esta discusión se basa principalmente en dos ideas. Primero, que la explotación de un recurso crece efectivamente de forma exponencial hasta la sima y después declina de forma también exponencial. Segundo, que una vez que se ha pasado la sima, la producción es indefectiblemente más difícil y cara, puesto que los yacimientos más fáciles de explotar (más cercanos a la superficie, de mayor dimensión, etc.) ya se han agotado y ha llegado el momento en el que sólo queda la mitad *más cara* del recurso. Así, una vez pasada la sima iniciaría la era del petróleo caro.

Muchos autores afirman que la sima del petróleo se encuentra muy cerca, si no es que ya la pasamos. Cumpliendo el pronóstico de Hubbert, la producción de petróleo en EEUU alcanzó su punto máximo en 1970, momento a partir del cual comenzó a declinar. Según muestran Campbell y Laherrère (1998), el mismo patrón de agotamiento y declinación se observa progresivamente en todos los países productores, al punto que, con excepción de la región del Medio Oriente, la producción de petróleo en el resto del mundo alcanzó su sima en 1997. Desde el año 1964 se alcanzó el punto máximo en el nivel de descubrimiento de reservas de petróleo convencional, y actualmente, por cada barril de petróleo que se descubre se consumen cerca de cuatro. Dado que el comportamiento de la producción tiene inevitablemente que reflejar, con un rezago, el del descubrimiento, la sima o punto máximo en la producción es inminente

explotación de yacimientos. Las reservas, entonces, pueden crecer a través de mecanismos como la adición de nuevos descubrimientos, el avance en tecnologías de recuperación y la modificación de las condiciones que determina la viabilidad económica de los proyectos.

⁹ Las reservas de hidrocarburos se dividen, primero, entre recursos descubiertos y no descubiertos. Éstos últimos constituyen estimaciones iniciales o recursos prospectivos, cuyas características están por determinarse. Una parte de estos recursos prospectivos es irrecuperable. Los recursos descubiertos, se dividen a su vez en dos categorías: comercial y sub-comercial. Éstos últimos son recursos contingentes, es decir, que dependen de cambios en precios y costos para que su producción resulte viable y una parte de ellos también es irrecuperable. Finalmente, las reservas comerciales se subdividen a su vez en probadas, probables y posibles, cuya definición depende del grado de inversión que es necesario realizar para extraer el recurso

¹⁰ En 1962, M. King Hubbert, un geólogo de la Universidad de Columbia, desarrolló para los laboratorios de Shell un método para estimar la producción futura de petróleo en los EEUU. Este método consiste en estimar mediante un modelo logístico, el punto en el que se ha extraído la mitad de las reservas totales, la tasa de decaimiento de las reservas o, alternativamente, las reservas totales, en función de la historia de producción anual. La gráfica de Hubbert es una parábola (una U invertida) que asume que la producción crece de forma exponencial al inicio de la serie hasta alcanzar la “sima” y después decae de forma también exponencial. Véase por ejemplo Deffeyes (2001) o el capítulo de Seppo Korpela en McKillop y Newman (2005).

(Laherrère, 1999). En la misma dirección apuntan las evidencias de que la producción de los campos petrolíferos más grandes del mundo ha entrado también en la fase de declinación (Höök, et al, 2009). La estimación de Deffeyes (2001) es que la suma de la producción global se habría alcanzado en 2003 y el total de barriles recuperables rondaría los 2.12 billones (2.12×10^{12}). La Asociación para el Estudio sobre la Sima del Petróleo (ASPO por sus siglas en inglés), declaró en 2002 que la información disponible sobre reservas de petróleo y las estimaciones de las cantidades por descubrir indica que la producción mundial alcanzará un punto máximo alrededor de 2010, en 87 millones de barriles diarios, para empezar a declinar después (Alekklett, 2010). Estas estimaciones señalan que el sistema basado en el petróleo estaría en el umbral de una transformación mayúscula, para la cual ningún sistema económico está preparado.

La AIE es más optimista acerca del tamaño y duración de las reservas de petróleo. En su informe de 2008, establece que las reservas probadas de aceites convencionales alcanzan los 1.2 billones de barriles (40 años a la tasa de consumo actual), existen unos 3.5 billones de barriles en reservas convencionales recuperables (suficientes para unos 114 años). A esto podrían todavía añadirse recursos no convencionales como las arenas bituminosas y aceites extra-pesados, que aportarían entre 1 y 2 trillones de barriles más, que extenderían las posibilidades de consumo hasta unos 180 años (AIE, 2008, p. 197, 201-208)¹¹. Más aún, estas cifras pueden todavía expandirse de manera considerable si las tasas de recuperación de pozos existentes aumenta debido mediante procedimientos de recuperación mejorada de petróleo (AIE, 2008, 209-211). Estos procesos permiten revitalizar la producción de pozos maduros de forma que en vez de una U invertida (la curva de Hubbert), la serie asemeja una M, con una segunda expansión de la tasa anual de producción. Aumentar la tasa de recuperación del actual 32 a un 50% añadiría a las reservas recuperables una cantidad equivalente a la de las reservas probadas (1.2 billones de barriles). El capital está convencido de que no hay crisis de los hidrocarburos que no pueda ser lo suficientemente bien administrada como para seguir obteniendo jugosas ganancias de yacimientos altamente rentables y exprimir sus activos hundidos en infraestructura¹².

¹¹ Entre ellas, se encuentran las reservas acumuladas en los esquistos de petróleo en la Cuenca del Green River, Canadá, que es tres veces más grande que las reservas de crudo de Arabia Saudita.

¹² El petróleo del Medio Oriente sigue ofreciendo rentas difíciles de despreciar. Según la misma AIE (2008), los costos totales de producción en los yacimientos de Arabia Saudita (\$4-6 USD), Iraq (\$4-6 más “costos de seguridad”) los Emiratos Árabes (\$7) son bastante más atractivos que los de Ecuador o Venezuela (\$20 ambos) (ver Reuters, Julio 28)

Aunque estos dos conjuntos de argumentos parecen opuestos (y a menudo lo son, cuando se presentan como preludeo a juicios como “se avecina el inminente colapso” o “ningún problema, podemos seguir bombeando tranquilos”), en realidad hay en ambas posiciones consensos bastante significativos, sobre todo si ampliamos los rangos de ocurrencia de los eventos. Primero, que los costos de producción tenderán a subir a partir de la segunda década del siglo XXI desplazándose hacia el rango de los \$40-\$80 dólares por barril. Segundo, las reservas convencionales que pueden contener los precios alcanzarán para un rango temporal de entre 40 y 75 años, después de lo cual sólo será posible producir petróleo a costos mucho mayores (entre \$80 y \$100, o entre \$112 y \$200 si se consideran además sistemas de captura de dióxido de carbono). Finalmente, que después de cruzada la cima (en cualquier momento entre ahora y los siguientes 10 años), la producción no se derrumbará exponencialmente, sino que probablemente seguirá un ritmo de agotamiento más lento, en forma de meseta. Por supuesto, las posiciones difieren en cuanto a la dinámica del agotamiento (abrupto o gradual) y sobre todo en lo que implica para la capacidad de adaptación del sistema económico global.¹³

Aunque el gas puede sustituir al petróleo (y de hecho lo ha venido haciendo ya) como materia prima para petroquímicos, calefacción, refrigeración y generación de electricidad, todavía más del 70% del transporte utiliza derivados del petróleo (diesel, gasolina y gasavión). Sin un profundo proceso de sustitución de combustibles, el aumento de costos del transporte internacional tiene el potencial de modificar la estructura espacial, el grado de articulación y la dinámica misma de toda la economía global, que es sumamente intensiva en energía y particularmente en el tipo de energía que proporciona el petróleo. Es posible, por supuesto, que aumentos en la eficiencia en las tecnologías del transporte y en particular a través de la modificación integrada de sistemas completos (como examinaremos más adelante), el sistema económico pueda absorber sin fragmentarse el impacto de hidrocarburos más caros. El impacto sería por supuesto diferenciado según la intensidad relativa de utilización de hidrocarburos, el

¹³ Los hidrocarburos no convencional conllevan costos, riesgos e impactos ambientales mayores que el crudo convencional. La producción de petróleo a partir de arenas bituminosas exige enormes inversiones fijas (del orden de los \$20 mil millones de dólares) para separar los lodos del agua, que sólo parecerían rentables con precios del orden de los \$200 dólares por litro. Pero peor aún, las minas de arenas bituminosas producen un impacto ambiental sin precedentes, con depósitos de residuos peligrosos tan grandes que pueden verse desde el espacio, con enormes riesgos de fugas y derrames a ríos y mares, un tremendo nivel de emisiones y consumo inimaginable de agua, para los que ni siquiera existen evaluaciones de impacto adecuadas. Finalmente, las tasas de productividad energética son realmente bajas, de 1/3-5 (una unidad de energía invertida produce entre 3 y 5 unidades de energía cosechada).

sobre-costos de las alternativas, el tamaño de las rentas, etc. Después de todo, con precios más altos las alternativas que hoy no son rentables comenzarían a serlo y los incentivos privados para instalar equipos más eficientes y basados en otras fuentes de energía podría liberar parte de la presión de la demanda sobre los precios de los hidrocarburos¹⁴.

El sistema energético global tendrá que aceptar costos mucho más altos, ya si acelera la penetración de sistemas renovables y de mayor eficiencia, ya si prolonga la vida de los sistemas fósiles instalando sistemas de recuperación mejorada y captura de CO₂. Eso significa que la economía global deberá aceptar una compactación generalizada de las tasas de ganancia debido a costos energéticos mayores. Aquí surgen entonces dos grandes preguntas: ¿Es esto compatible con una salida de la crisis capitalista? Más aún, ¿puede el sistema ajustar a la baja la utilización de combustibles fósiles a una velocidad necesaria para evitar una catástrofe climática? El sistema climático no resistirá ese tiempo a las tasas de emisión actuales y de persistir estas tendencias se modificará, probablemente de forma irreversible, antes de que esos combustibles comiencen a escasear significativamente.

III. Transiciones

Las transiciones energéticas son un proceso de transformación radical en el perfil tecnológico de las sociedades, en el que se modifican no sólo las fuentes dominantes de energía, sino todo el sistema técnico que soporta su uso. Este sistema técnico está conformado no sólo por la infraestructura física, sino también por procesos (generación, conversión, distribución y aplicación), prácticas (operación, control, solución de problemas) y conocimientos (el cuerpo científico-tecnológico sobre el cual se diseñan problemas y soluciones válidas) que la hacen funcionar. Estas transformaciones toman la forma de una sucesión de grandes sistemas tecnológicos que emergen desplazando lentamente al modelo dominante anterior hasta consolidarse, para ser desplazados a su

¹⁴ En la coyuntura actual este ajuste terso parece altamente improbable. Tanto los EEUU como la Unión Europea enfrentan restricciones en cuanto a su capacidad de ajuste externo, dado su fuerte nivel de endeudamiento interno y políticas monetarias restrictivas. El sistema financiero sigue parcialmente colapsado como para financiar grandes proyectos de larga maduración. Por supuesto, el impacto de un movimiento en este sentido golpeará duramente a los países más pobres y entre ellos a los importadores de hidrocarburos.

vez por una nueva configuración.¹⁵ Puesto que estos sistemas tecnológicos no existen en el vacío, sino que están imbuidos en el sistema social y económico, las transiciones energéticas van aparejadas con cambios profundos en las formas de organizar y regular la producción, el consumo y la distribución, y en última instancia con los valores e ideología hegemónicos.

Como puede verse en las gráficas 3 y 4, la energía primaria en el mundo durante los últimos 200 años ha pasado dos transiciones importantes, primero de la biomasa al carbón en el siglo XIX, y luego del carbón al petróleo, a lo largo del siglo XX. Estas transiciones han sido mucho más pronunciadas en las economías industriales y ocurren en largos periodos de tiempo, con fases bastante bien diferenciadas de aceleración y estabilidad.

Aunque asociamos la “era del carbón” con los inicios de la revolución industrial y la máquina de vapor finales del siglo XVIII, la penetración del carbón como la principal fuente primaria de energía en el mundo se extendió hasta por lo menos los años 1920, cuando alcanzó su mayor participación en la mezcla de energía primaria global. Durante este largo periodo, el uso de la leña como fuente dominante de energía en el mundo se redujo lentamente hasta la primera mitad del siglo XIX y después de forma acelerada entre 1870 y 1910, cuando alcanzó los niveles que conserva actualmente (alrededor de un 10% de la energía primaria total). Hacia 1900, las economías industriales, con sólo 30% de la población mundial consumían el 90% de los combustibles fósiles del planeta (Smill, 1994, p. 234). Entre 1920 y 1970, el carbón fue paulatinamente desplazado por una combinación de petróleo y gas natural, reduciéndose desde su punto más alto de 70% a alrededor de un 20% de la energía total (con un significativo “rebote” en los últimos 20 años). A finales de los 1950, comenzó también la lenta penetración de fuentes no-fósiles, principalmente la energía hidroeléctrica y nuclear.

El “gran patrón” de las transiciones energéticas de los últimos 200 años exhibe cinco rasgos principales, que encarnan cambios cualitativos y cuantitativos fuertemente relacionados entre sí.¹⁶ **Primero**, un crecimiento exponencial de los niveles de uso

¹⁵ La lógica que produce este patrón es sencilla: el progreso técnico consiste sobre todo en el mejoramiento gradual de un diseño básico más o menos estable, sacudido de cuando en cuando por la introducción de nuevos principios. El carácter acumulativo es una propiedad robusta del cambio técnico. A su vez, los nuevos principios son casi siempre una síntesis de avances anteriores. Por supuesto, la definición de lo que significa progreso se nutre del contexto social.

¹⁶ Distinguimos, con fines analíticos entre países industrializados, que corresponden con los de la lista de la OCDE de 1990, y países de la periferia (“en desarrollo”). Grübler (2008) distingue además a los países del antiguo bloque socialista, que en nuestro caso no consideramos este grupo de forma separada. La Gráfica 4 incluye los tres grupos.

globales de la energía, altamente diferenciados regionalmente. Este crecimiento está muy concentrado en los países industrializados, en los que si bien la población mantuvo un crecimiento relativamente moderado en el periodo, el crecimiento del consumo energético per capita ha sido exponencial. En los países de la periferia, por el contrario, es la población la que creció exponencialmente, mientras que el consumo energético per capita lo hizo de forma lineal (véase sobre este punto Grubler, 2006). Actualmente, los habitantes de países industrializados consumen en promedio 7 veces más energía (244 GJ al año, equivalentes a 40 barriles de petróleo) que los habitantes en países pobres (35 GJ al año o casi 6 barriles de petróleo). **Segundo**, existe un proceso paulatino de sustitución de combustibles tradicionales por “modernos” o mercantiles, que se expresa también en la sustitución de combustibles sólidos (biomasa y carbón) por combustibles líquidos (gasolinas) y distribuidos en red (gas y electricidad). **Tercero**, existe una importante sustitución entre combustibles fósiles, de petróleo y gas por carbón y de gas por petróleo, ésta última en particular en la generación de electricidad. **Cuarto**, hay un aumento generalizado de los procesos de conversión, principalmente empujado por la penetración de la electricidad como vehículo energético. **Quinto**, existe una reverberación del proceso de transición de los países centrales a la periferia. En efecto, la “occidentalización” de las pautas de consumo final y la difusión de actividades industriales con su consiguiente demanda de energéticos ha expandido a escala global un patrón de utilización que descansa en la disponibilidad ilimitada de energía. Pero la expansión hacia la periferia no sólo ocurre con un rezago temporal, sino que sigue un patrón distinto, en el que el consumo de hidrocarburos se ha expandido no de forma secuencial sino simultánea (con el carbón y el petróleo sustituyendo a la biomasa).

Los procesos de “retirada” del petróleo y del carbón prácticamente se detuvo y el gas natural, que se proyectaba a finales de los 1970 como el combustible emergente alcanzó su punto máximo junto con el petróleo a principios de los 1980. Este hecho sobresale sobre todo porque hasta antes de la década de 1970 podría haberse afirmado que las transiciones estaban acelerándose: la transición al carbón habría tomado 110 años, mientras que la del petróleo sólo 75 (en el caso de los países industrializados, Gráfica 4). Pero es desde esa década que la combinación de los tres principales combustibles fósiles se ha resistido a reducirse o a cambiar de composición, en ambos grupos de países. De hecho, en la última década presenciamos un relanzamiento en el

consumo del carbón, principalmente detonado por la gran expansión de la generación de electricidad en plantas de muy alto rendimiento en China¹⁷.

Grübler y Nakicenovic (1987 y 1999) argumentan que los procesos de transición no responden primordialmente a la escasez o a los cambios en los precios. Ambas transiciones históricas (al carbón y al petróleo) fueron más bien el resultado de cambios profundos en las tecnologías de uso final y en la calidad y formas de energía consumida. Ni la leña ni el carbón escasearon o subieron de precio de manera significativa a largo del proceso. La principal fuerza detrás del cambio fue la difusión de formas de aplicación y procesos de conversión, es decir, de máquinas de vapor (en la transición al carbón) y de motores de gasolina y eléctricos (en la transición al petróleo y al gas), que introdujeron nuevas funciones y aplicaciones de uso, desatando procesos de innovación subsecuente en las plataformas de generación y distribución de energía primaria. El motor de las transiciones se localiza en el lado de la demanda, no en el de la oferta de energía. Otro cambio estructural importante, que confirma la importancia de la naturaleza del consumo de energía, es la diversificación y creciente especialización de las aplicaciones finales de energía, acompañados de la profundización de los procesos de conversión. Las versiones sólidas del combustible (leña y carbón) han cedido el lugar frente a los productos mucho más elaborados de combustibles, en sus formas líquidas con cualidades mucho más específicas para producir fuerza motriz para el transporte y el trabajo físico, luz, control de la temperatura, así como las múltiples aplicaciones de la electricidad mediante las tecnologías de información y comunicación. Esto lleva aparejado el notable proceso de profundización de procesos de conversión, principalmente a través de la expansión de los sistemas de energía secundaria, como la electricidad. Así, la transformación de la mezcla primaria de combustibles que comentamos anteriormente, se encuentra acoplada a un proceso de transformación (relacionado pero parcialmente autónomo) de especialización y diversificación de las formas de uso final de la energía y de extensión de las cadenas de transformación de unas formas de energía en otras. En tanto que mayor conversión implica una mayor pérdida de energía, estos sistemas crecientemente diversos y complejos requieren al mismo tiempo un nivel de consumo global superior.

¹⁷ La revitalización del carbón como fuente de energía responde a dos factores. Primero, como mencionamos, las reservas de carbón resultan muy atractivas y estables, en particular para los países que las concentran (EEUU, China y Rusia). En segundo lugar, las tecnologías de generación carboeléctrica alcanzan niveles de eficiencia de hasta 50%, muy cercanos a la de turbinas de gas natural que operan en ciclo combinado (50-54%). Aunque son menos versátiles que estas últimas (no pueden encenderse y apagarse rápidamente), son atractivas para operadores de red para alimentar la carga base.

IV: Renovables

La pregunta de si es posible una transición a un sistema energético basado (por lo menos de forma mayoritaria) en energías renovables y limpias, tiene una respuesta muy simple: sí. Existen por supuesto varios argumentos que subestiman el potencial de las energías renovables (véase por ejemplo, Smil, 2006). Estos argumentos reflejan muchas veces la necesidad de conservar el status quo y en otras un legítimo escepticismo. En todos los casos, nos parece importante revisar estos argumentos.

Un primer argumento en contra de la posibilidad de la transición es que ésta implica una gigantesca escala de reemplazo que no se puede cubrir con energía renovable. Considerando que un 75% de la energía primaria total proviene de combustibles fósiles, estamos hablando de unos 340 EJ/año. Pero las energías renovables pueden proveer entre 2 y 6 veces la energía que el mundo consume actualmente con tecnologías maduras (Lior, 2008; EREC, 2007). La energía total que proviene del Sol supera varios miles de veces los flujos comerciales (Johanssen, Thomas, Foreword, Elsevier Science Encyclopedia of Energy, p. xxvii). Según muchos estudios, la transición acelerada a un sistema global de energía relativamente más sustentable (por lo menos en los términos de estabilización de GEI a los 450 ppm) es técnicamente posible siempre y cuando se realice en combinación con aumentos importantes de eficiencia energética y de reducción del consumo. Según el Consejo Europeo de Energías Renovables, la demanda final de energía global podría reducirse un 47% hacia 2050 (EREC, 2007, p. 5), de 810 EJ/año a 422 EJ/año (es decir, evitando el aumento pronosticado de 50% en la demanda final). La demanda actual es de alrededor de 435 EJ/año.

El fin de los combustibles fósiles “baratos” imprimirá restricciones muy importantes en el uso de energía en el futuro. Durante los siglos XIX y XX, el sistema económico consumió cantidades crecientes de carbón, petróleo y gas natural cuya extracción implicaba costos bajos tanto en términos de inversión monetaria como de inversión energética, puesto que estos recursos se encontraban en condiciones de extracción y transporte accesibles. Al avanzar el proceso de explotación, mantener un nivel creciente de consumo de energía se ha apoyado en la extracción de combustibles fósiles menos accesibles. Esto ha producido la tendencia generalizada a la reducción en la eficiencia energética de los sistemas de energía en todo el mundo. La eficiencia energética de los sistemas que producen energía se mide con la tasa de beneficio energético neto o beneficio energético por energía invertida (EROI, por sus siglas en inglés de Energy

Return on Investment), es decir, la razón entre energía invertida y energía obtenida. Además, los combustibles fósiles disponibles también serán producidos a niveles de eficiencia mucho menores que los del pasado. La EROI máxima del petróleo extraído en los E.U. descendió de 100 a 1 en 1930, a 30:1 en 1970 y a 14:1 en el año 2000 (Konrad, 2005).

La tasa de beneficio energético de los recursos energéticos disponibles parecería indicar que la mezcla de combustibles en el futuro será de una eficiencia energética considerablemente menor. Este argumento se sigue del hecho de que la energía renovable como el viento y fotovoltaica, así como el gas natural y los biocombustibles de segunda generación (preferibles desde el punto de vista ambiental) tienen todas tasas de beneficio energético menores a las del carbón y el petróleo. Si toda la riqueza de los últimos 150 años está basada efectivamente en enormes excedentes energéticos (gastando un barril de energía para obtener 100), las bases de todo el sistema económico estarían amenazadas por las nuevas condiciones estructurales de un sistema energético que sólo puede obtener rendimientos decrecientes. Smil, Campbell, y una larga lista de autores señalan insistentemente este rasgo como la barrera definitiva para una transición suave fuera de los hidrocarburos. Este argumento, sin embargo, se basa en una comparación incorrecta del “costo energético” real de los combustibles fósiles, que ignora las inversiones de energía que son necesarias para trasladar y procesar los combustibles fósiles hasta el lugar de consumo.

Cuando se compara combustibles fósiles con fuentes renovables para producir electricidad, los últimos son energéticamente más eficientes. Brown y Ulgiati (2004) comparan la energía incorporada en insumos y materiales consumidos en la construcción (divididos por la vida media de las instalaciones), junto con la energía consumida en mantenimiento y producción de energía. Las tecnologías de generación de electricidad con petróleo y bioetanol produjeron en este estudio una tasa de retorno significativamente menor a la tecnologías de viento, geotermia e hidroeléctrica (0.30 y 1.5, contra 7.67, 20.76, y 23.73, respectivamente). A su vez, la energía de viento puede producir hidrógeno mediante electrólisis con una rentabilidad energética mucho mayor a la del petróleo o el gas (con tasas de retorno de 6.10 contra 0.24 y 0.77, respectivamente). En resumen, es falso que un futuro basado en energías renovables sea energéticamente más caro, una vez que se consideran los costos de conversión.

Muchas estimaciones del desempeño de vehículos alternos indican que la superioridad energética de la gasolina tiende a desaparecer una vez que se considera la

eficiencia de la máquina de combustión interna. La eficiencia global de un vehículo depende no solo del contenido energético del combustible, sino también de la eficiencia de los procesos de conversión involucrados a lo largo de toda la cadena de extracción, refinación, transporte, almacenamiento y transformación final en trabajo. A grandes rasgos, colocar una unidad de energía en forma de gasolina o diesel en el tanque de un vehículo implica pérdidas de energía de entre 10 y 20% de la energía original, mientras que en el caso de los vehículos de celda de hidrógeno o eléctricos este gasto es de entre 30 y 50% para los primeros y de 50% para los segundos. Sin embargo, la eficiencia final de los vehículos no convencionales es mucho mayor. Los vehículos a gasolina o diesel requieren más energía en el tanque para recorrer la misma distancia que los autos movidos por hidrógeno y mucho más que los eléctricos. El consumo de energía necesario para recorrer un kilómetro es de 2 Mj/km para autos de gasolina, entre 1.2 y 1.8 Mj/km los de diesel, 1.1-1.3 Mj/km para los de celda de hidrógeno y apenas 0.4 Mj/km para los eléctricos). Considerando ambos segmentos del proceso de conversión, el rango de eficiencia global o “del pozo a la rueda” de vehículos convencionales es de entre 0.28 y 0.64 km/Mj. El mismo indicador para los autos de celda de hidrógeno eléctricos es de cerca de 0.7 y de 1.1km/Mj para los eléctricos¹⁸. En resumen, los vehículos de combustión interna requieren más energía para recorrer un kilómetro que los actuales autos eléctricos o de celda de combustible. El “superavit” energético de los combustibles fósiles desaparece así para dejar al descubierto un gigantesco desperdicio. Más aún, al considerar los efectos ambientales las tecnologías alternas son mucho más eficientes, dado su muy bajo nivel de generación final de emisiones. Las emisiones globales (“del pozo a la rueda”) de los autos eléctricos serían de una cuarta parte de un auto a gasolina y una tercera parte de un auto a diesel.¹⁹ Por su parte, los vehículos híbridos a diesel y de celda de hidrógeno más recientes, podrían reducir hasta un 60%

¹⁸ Datos aproximados. Fuentes: Informe 2005 del Proyecto de Demostración del Hidrógeno y la Celda de Combustible de Japón (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project) un consorcio publico-privado que incluye a todas las principales empresas automotrices Japonesas (www.jhfc.jp) y Eberhard y Tarpenning (2006) de Tesla Motors, un fabricante norteamericano de vehículos eléctricos. Como podría esperarse, existe una intensa guerra de cifras sobre las eficiencias globales y específicas de las distintas tecnologías de automóviles. An y Santini (2003) contrastaron un conjunto de estudios comparativos sobre el desempeño energético y ambiental (emisiones de GEI) de vehículos híbridos y de celda de combustible, concluyendo que a pesar de las diferencias metodológicas, el desempeño de ambos tipos de vehículo era muy cercano y no decisivo. Pero los autores notan además que los resultados de los estudios, realizados por el MIT, General Motors y dos consultoras independientes, correspondían con las preferencias institucionales

¹⁹ De nuevo, los cálculos provienen del JHFCP (2005). Las emisiones y eficiencias de conversión están calculadas según las condiciones del sistema eléctrico y combustibles de Japón.

las emisiones de GEI con respecto a la media de emisiones vehiculares en EEUU, con un costo 30% mayor (Decicco, 2005).

La densidad de fuerza de las energías renovables también es menor, es decir, se necesita mucho mayor espacio de “cosecha” por unidad de energía utilizable. Mientras que los combustibles fósiles generan energía en el orden de los 100-1000 Watts por metro cuadrado (W/m^2), la energía de viento y la fotovoltaica se encuentran en el orden de los $10w/m^2$ y $20W/m^2$ respectivamente (Smil, 2006, p. 22). En el caso de los biocombustibles la relación es apenas de $1W/m^2$. El uso de energías renovables tiene implica una competencia por recursos con actividades como la producción de alimentos y limitaciones de espacio en el caso de los sistemas urbanos. Más aún, esta intensidad en el uso de la tierra puede generar problemas de derechos entre los centros de consumo y las comunidades donde se encuentran los recursos. Pero este argumento en contra del amplio uso de energías renovables parece ignorar dos cosas. Primero, que los combustibles fósiles y energías convencionales también requieren el uso exclusivo de amplias zonas territoriales para sus sistemas de distribución y extracción; peor aún, las descargas de desechos contaminantes y emisiones de GEI, tanto las que se generan de manera normal como las que resultan de accidentes y fugas, amplían en varios órdenes de magnitud su impacto territorial. Segundo, que la flexibilidad de escala de las fuentes renovables permite un rango mucho más amplio de adaptación de los sistemas que las producen con los ambientes naturales y sociales de aplicación. En comparación con las energías convencionales, los sistemas de energías renovables de pequeña escala (solar, viento, pequeña hidroeléctrica, biocombustibles basados en desechos de la agricultura, etc.) pueden acoplarse con mucho menor impacto social y ambiental a las formas de organización y producción existentes. Sin embargo, cuando las energías renovables se manifiestan en proyectos de gran escala, administrados de forma privada, centralizada y a distancia, estos sistemas tienen el potencial de resultar enormemente depredadoras del ambiente natural y social.

Aquí es necesario hacer un paréntesis y considerar aparte el tema de los biocombustibles. La biomasa es el combustible dominante entre las energías renovables. Más del 75% de la energía renovable que actualmente se consume es biomasa (entendida como combustibles renovables y desechos), lo que equivale al 14% de la energía primaria total en el mundo. El uso de biomasa es mayor (60% en África, 42% en Asia y 19% en América Latina). Alrededor de 2,700 millones de personas en el planeta dependen de la biomasa para cocinar y calefacción. Aunque en términos

relativos (como proporción de la energía total) el uso de biomasa desciende al aumentar el ingreso y generalizarse el uso de combustibles fósiles, el impacto sobre los ecosistemas terrestres para la producción de energía aumenta en términos absolutos. Esto significa no sólo un aumento generalizado de la presión sobre ecosistemas naturales sino también sobre los sistemas de producción de alimentos. Estimaciones de 2000 indicaban que para satisfacer el aumento en la demanda de alimentos la frontera agrícola deberá expandirse alrededor de 1,700 millones de hectáreas para el año 2100, mientras que el aumento de la superficie agrícola dedicada a la producción de biomasa para consumo energético debería hacerlo en un rango de entre 690 y 1,350 millones de hectáreas.²⁰ Aún considerando que estas cifras pueden estar sobreestimadas, en perspectiva con los recursos agrícolas totales resultan estremecedoras. Satisfacer ese aumento de 3 mil millones de has. significa expandir en un 60% la superficie agrícola actual, en otras palabras, una expansión de la frontera agrícola 8 veces superior a la ocurrida en el mundo como resultado de la “revolución verde” a partir de los años 1960.²¹

En el planeta existen casi mil millones de personas que viven en permanente riesgo alimentario. La presión sobre los ecosistemas de los cuales depende la alimentación humana aumentaría considerablemente con la difusión de bio-combustibles. Una estimación reciente indica que el aumento en la producción de biocombustibles de primera generación necesario para cubrir un 8% (12%) de la demanda de energía del sector transporte hacia 2020 (2030) aumentaría la población en riesgo alimentario en 131 (135) millones de personas²². Aún si estos planes se complementan con una introducción acelerada de biocombustibles de segunda generación, el impacto sobre la población en riesgo de hambruna sólo descendería a 75 (57) millones para 2020 (2030). Discusión sobre biocombustibles: EROEI apenas superior a 1 o inferior ; peor aún, con las tecnologías de producción convencional, los biocombustibles son emisores netos de

²⁰ United Nations Development Programme, 2000. Energy and the challenge of sustainability. UNDP, New York.

²¹ La frontera agrícola, en el periodo de difusión de la “revolución verde” se expandió de 4.55 a 4.93 millones de has. (entre 1966 y 1996), es decir, 380 millones de has. WRI (2000), *World Resources 2000-2001, People and Ecosystems: The Fraying Web of Life*. Aunque la productividad agrícola en ese periodo de tiempo aumentó cerca de un 25%, el 40% de la tierra agrícola se encuentra fuertemente o *muy fuertemente* degradada (p. 54).

²² Fisher, Günther, Eva Hizsnyik, Sylvia Prieler, Mahendra Shah y Harrij va Velthuizen (2009), *Biofuels and Food Security*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)-OPEC Fund for International Development (OFID), Laxenburg.

gases de efecto invernadero.²³ En resumen, la expansión de biocombustibles amenaza severamente la seguridad alimentaria en los países pobres y arriesga la biodiversidad sin aumentar la seguridad energética ni reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La intermitencia de fuentes como la energía solar y de viento es un grave problema para el diseño de redes de distribución eléctrica. A diferencia de fuentes como los combustibles fósiles, la geotermia y la hidroeléctrica, las energías solar y de viento generan energía de forma discontinua y difícil de modular para ajustarse al ciclo diario de consumo de electricidad. Esto obliga a mantener otras fuentes tanto como carga de base como para los ajustes rápidos en horas pico y a ampliar los niveles de carga de reserva. No existe todavía un consenso técnico acerca de los límites máximos de fuentes intermitentes que las redes actuales pueden acomodar, aunque algunos informes señalan rangos de penetración de energía eólica del orden del 20-35% sin mayores problemas (ver por ejemplo, ERC, 2006). Otras instancias señalan que hay que proceder de forma inversa, adaptando los sistemas de red a las fuentes intermitentes (EREC, 2007 y 2010).

Finalmente, las energías renovables tienen una muy desigual distribución geográfica. Esto sólo es un problema si ignoramos primero, que los combustibles fósiles también y segundo, que países tan aparentemente escasos de recursos renovables, como es el caso de la exposición solar en Alemania y Japón, son los mayores productores de energía solar.

Es un grave error ignorar estas objeciones, en particular por aquellos interesados en promover futuros alternativos. Pero por supuesto que no son definitivas ni insalvables. La mayor parte de las objeciones se basan en una comparación unidimensional y aislada de las fuentes, en función de las características y arquitectura de los sistemas existentes. Las desventajas de las renovables en términos de sus cualidades individuales (densidad, tasa de retorno, etc.) pueden reducirse considerablemente si se consideran las ventajas que proporcionan en los sistemas de conversión en su conjunto. Por ejemplo, con la mayor eficiencia del motor eléctrico (de 70% frente al 15% del motor de gasolina), redes locales de distribución, sistemas híbridos y, sobre todo, menores niveles de

²³ Farigone, Joseph; Hill, Jason; Tillman, David; Polasky, Stephen; Hawthorne, Peter (2008-02-29). "Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt". *Science* **319** (5867): 1235–1238; Searchinger, Timothy; Heimlich, Ralph; Houghton, R. A.; Dong, Fengxia; Elobeid, Amani; Fabiosa, Jacinto; Tokgöz, Simla; Hayes, Dermot *et al.* (2008-02-29). "Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change". *Science* **319** (5867): 1238–1240.

consumo y desperdicio, la utilización de energías renovables puede igualar en conjunto las ventajas de los sistemas actuales.

Desde los años noventa existían estimaciones que proyectaban que las energías renovables podrían producir, hacia 2050, 60% de la electricidad y 20% de los combustibles de uso final, para un total de 30% del consumo energético global (Johanson et al., 1993, pp. 1–71). El Consejo Europeo para las Energías Renovables propone que una combinación de fuentes renovables (geotermia, hidroeléctrica, eólica y solar) podría abastecer un 70% de la energía primaria global, hacia el 2050 (EREC, 2007) y proveer toda la electricidad necesaria para la Unión Europea (EREC, 2010), todo ello con tecnologías conocidas y adelantos técnicos probados, no especulativos. La trayectoria reduce la utilización de energía nuclear e incrementa el de biomasa pero sólo en aplicaciones fijas (evitando así el impacto del transporte). Un escenario así permitiría reducir las emisiones de GEI globales en más del 50% y reducir muchos de los mayores peligros de la desestabilización climática. Para ello se plantea un nuevo esquema de redes pequeñas y descentralizadas, que incluye paneles solares distribuidos en el espacio urbano, el almacenamiento de energía intermitente superavitaria en baterías de automóviles eléctricos y una reducción en el consumo final de energía del 50%. Este escenario de electricidad renovable incluye la utilización de gas natural como tecnología transitoria para enfriamiento y calefacción, pero garantiza que las reservas de petróleo y carbón permanezcan en el subsuelo.

Aunque las alternativas técnicas existen, y en muchos casos, en particular en la UE, existen también las alternativas institucionales que “nivelan” las alternativas frente a las tecnologías entronizadas, el uso de energías fósiles está tremendamente entronizado.

5. Conclusión

Las características de los combustibles fósiles los hacen muy adecuados a la lógica de acumulación de capital. Pero no es la única plataforma disponible. De hecho, una integración de sistemas y fuentes alrededor de la red de fuerza eléctrica puede competir prácticamente con todas y cada una de esas características. ¿Es posible que el sistema de mercado, con la orientación adecuada por parte de un entramado institucional todavía en ciernes, tramite la transición, destruyendo creativamente la economía fósil? Cada vez parece más posible. Pero permanecen las dudas de si lo hará a la velocidad adecuada, cuáles serán las consecuencias para el sistema global y qué costo tendrá esto para la

población pobre del planeta. El tránsito parece más tortuoso para países arrinconados económica y políticamente como el nuestro.

Existe una enorme variedad de tecnologías maduras que aprovechan muy diversos tipos de fuentes renovables de energía, cuyo impacto ambiental es considerablemente menor al de los sistemas actuales y que pueden reemplazar prácticamente todas las aplicaciones de la energía fósil. Por supuesto, las opciones renovables no son intrínsecamente buenas o malas; es su contexto y grado de control social lo que las envilece o dignifica. Este tránsito implica no sólo una sustitución masiva y acelerada de estructuras físicas, sino sobre todo una transformación profunda en la forma de organizar la sociedad, eliminar el derroche y sustituir el principio del consumo ilimitado de energía (y el crecimiento infinito) por otro, basado en una cultura distinta de relación con el ambiente.

Sí es posible *destruir creativamente* los sistemas energéticos existentes y con ello reconstituir partes importantes de la vida económica y social. Para ello es necesario no sólo nuevas tecnologías (y la ampliación de aquéllas que ya funcionan y lo hacen de manera amigable con el ambiente) sino nuevos equilibrios sociales sobre los derechos de uso y conservación de los recursos y nuevas mecanismos de regulación social de los sistemas energéticos. Estos equilibrios no resultarán, evidentemente, de las concesiones de los que ya perciben gigantescos negocios en espacios potenciales de acumulación. Por eso es necesario tener claro el principio de que el carácter de la tecnología como mediación entre la actividad humana y la naturaleza exige que esa tecnologías se adapten a las necesidades de la sociedad, no al revés.

Referencias bibliográficas

- AIE (2008), *World Energy Outlook 2008*, Agencia Internacional de Energía, Paris.
- AIE (2010), *Key World Energy Statistics 2010*, Agencia Internacional de Energía, Paris.
- Aleklett, K. (2010), “Post-Peak – The future of the oil production 2010-2030, presentación en la Conferencia Anual 2010 de la Association for the Study of Peak Oil and Gas, 18 de mayo (<http://www.energiekrise.de/>).
- Altvater, E. (2007), “Fossil capitalism?”, en Leo Panitch y Colin Leys (eds.), *Coming to terms with Nature*, Monthly Review Press, Nueva York.

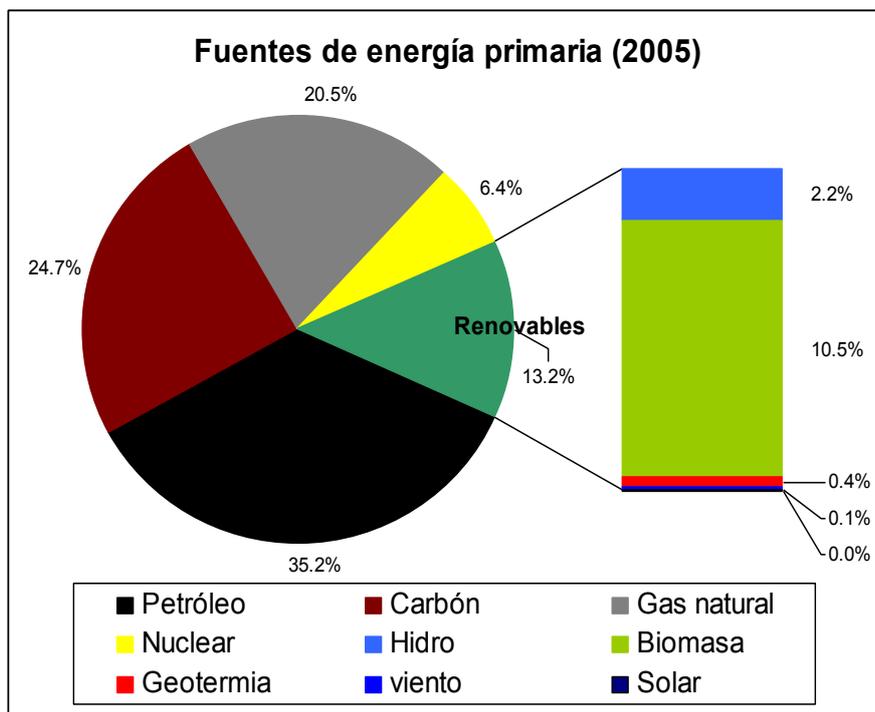
- An, Feng y Danilo Santini (2003), “Assessing Tank-to-Wheel Efficiencies of Advanced Technology Vehicles,” Argonne National Laboratory, Documento de Trabajo 2003-01-0412, Argonne, Illinois.
- Boulding, K.E. (1973), “The economics of energy”, en *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, no. 410, pp. 120-126.
- BP (2010), Statistical Review of World Energy, British Petroleum, Junio de 2010: <http://www.bp.com/statisticalreview>
- Brown, Mark T. y Sergio Ulgiati (2004), “Emergy analysis and Environmental Accounting”, en *Science Enciclopedia of Energy*, Elsevier, Vol. 2, pp. 329-354.
- Campbell, C.J. y J. Laherrère (1998), “The end of cheap oil”, en *Scientific American*, Marzo.
- Catton, W.R. (1982), *Overshoot: the ecological basis of revolutionary change*, University of Illinois Press, Chicago.
- Decicco, John (2005), “Fuel Cell Vehicles”, en *Science Enciclopedia of Energy*, Elsevier, Vol. 2.
- Deffeyes, K.S. (2001), *Hubbert’s Peak*, Princeton University Press.
- ERC (2006), “The costs and impacts of intermittency: An Assessment of the Evidence on the costs and impacts of intermittent generation on the British electricity network”, United Kingdom Energy Research Centre, Imperial College, Londres.
- FAO (2010), *The state of food insecurity in the world 2010*, Organización para la Agricultura y la Alimentación, Naciones Unidas (<http://www.fao.org/docrep/013/i1683e/i1683e.pdf>).
- Grübler, A. (2004) Transitions in energy use, en *Science Enciclopedia of Energy*, Elsevier, Vol. 6, pp. 163-177.
- Grübler, A. (2008), “Energy transitions”, en *Encyclopedia of Earth*, C. J. Cleveland (ed.), Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, Washington, D.C.
- Grübler, A. y N. Nakicenovic (1987), “The dynamic evolution of methane technologies”, en H. Lee, D. Dreyfus y T. Vasko (eds), *The methane age*, Kluwer Academic Publishers, Londres y Boston.
- Grübler, A., N. Nakicenovic y D. Victor (1999), “Dynamics of energy technologies and global change”, en *Energy Policy* 27, pp. 247-280.

- Höök, M., R. Hirsch and K. Aleklett (2009), “Giant oil field decline rates and their influence on world oil production,” in *Energy Policy*, Vol. 37, issue 6, pp. 2262-2272.
- Johanson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H. (1993), “Renewable fuels and electricity for a growing world economy: defining and achieving the potential”, en Johanson, T.B., Kelly., H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H. (eds.), *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Earthscan, Island Press, Washington, DC.
- Johanson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H. (1993), “Renewable fuels and electricity for a growing world economy: defining and achieving the potential”, en Johanson, T.B., Kelly., H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H. (eds.), *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Earthscan, Island Press, Washington, DC.
- Konrad, Tom (2005), “Managing the Peak Fossil Fuel Transition: EROI and EIRR”, en *Scientific American*, no. 156, pp. 456-471.
- Laherrère, J. (1999), “World oil supply, what goes up must go down, but when will it peak?”, en *Oil & Gas Journal*, Febrero 1.
- Lior, N. (2008), “Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future”, en *Energy* vol. 33, pp. 842–857
- Martínez-Alier, J. y J.M. Naredo (1982), “A Marxist precursor of energy economics: Podolisky”, en *The Journal of Peasant Studies*, 9, enero, 207-224.
- Martínez-Alier, J. y K. Schlüpmann (1991), *La ecología y la economía*, Fondo de Cultura Económica, México.
- McKillop, A. y S. Newman (eds) (2005), *The final energy crisis*, Pluto Press, Londres.
- Ponting, C. (1991), *A Green History of the World*, Penguin Books, Nueva York.
- Reuters, Julio 28 de 2009 (documento de prensa) *Factbox-Oil production cost estimates by country* (compilado de documentación del *World Energy Outlook 2008*).
- Simmons, I.G. (1989), *Changing the Face of the Earth: culture, environment, history*, Basil Blackwell, Oxford.
- Smil, V. (1991), *General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- Smil, V. (1994), *Energy in World History*, Westview Press, Boulder, CO.

— Smil, V. (2006), “21st century energy: some sobering thoughts”, en *OECD Observer*, 258(59), pp. 22-26.

ANEXO: GRAFICAS Y CUADROS

Gráfica 1



Fuente: Agencia Internacional de Energía.

Cuadro 1

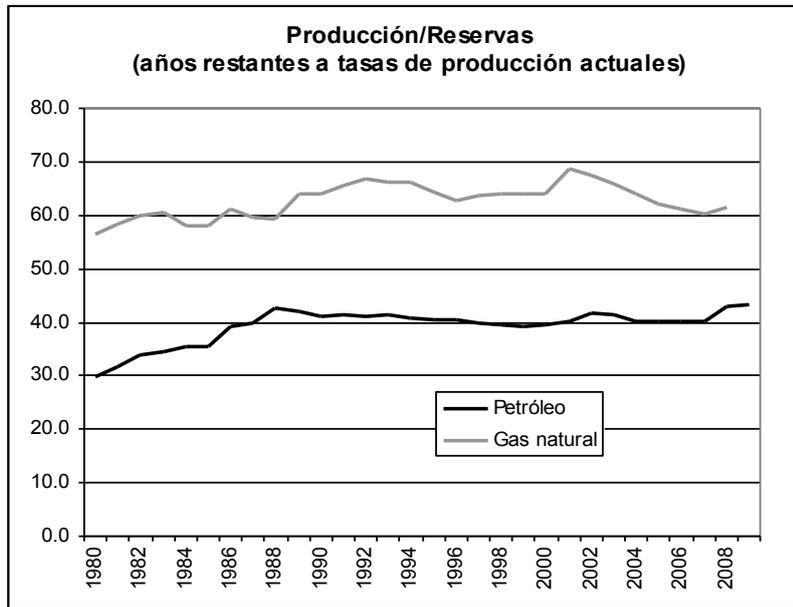
Reservas mundiales de energía por tipo de recurso		
Combustible	reservas probadas en ZJ ¹ /año	
	bajo	alto
Carbón	19.8	
Petróleo	8.1	35.1
Convencional		8.1
Arenas bituminosas		2.0
Petróleo pesado		3.0
Esquistos		11.0
Crecimiento de reservas		11.0
Gas	8.1	
Nuclear	17	1000
Viento	0.15	0.5
Geotérmica	5	200
Biomasa	0.2	0.4
Hidroeléctrica	0.04	0.6
Solar	50	5000

Fuentes: Lior, 2008; US Geological Survey, 2000; IEA, 2008.

Notas:

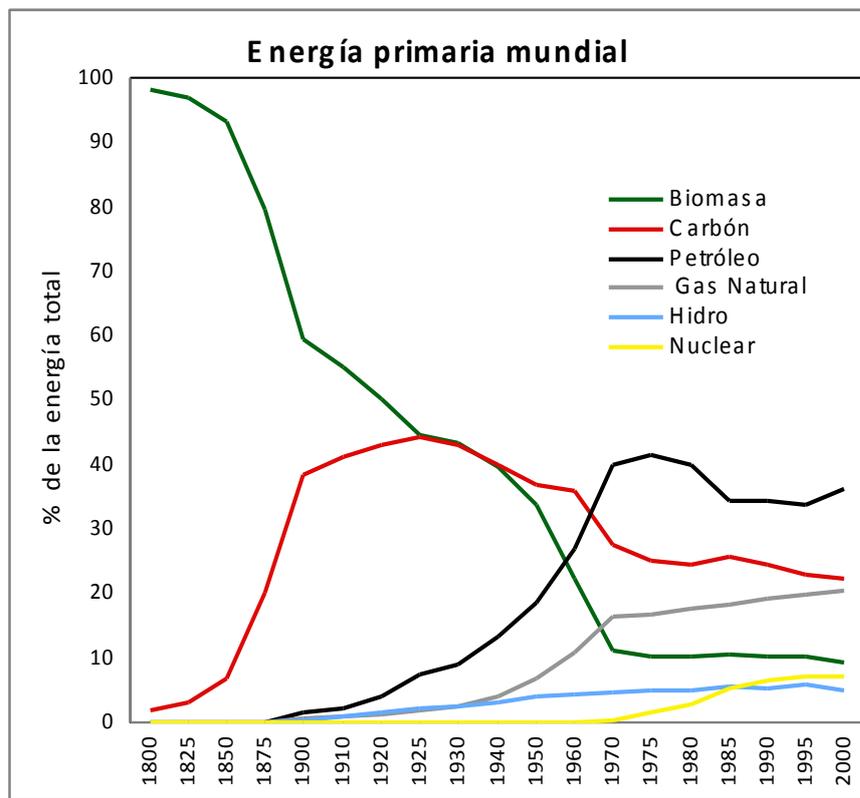
¹ Zetta-Joules: 1×10^{21} Joules

Gráfica 2



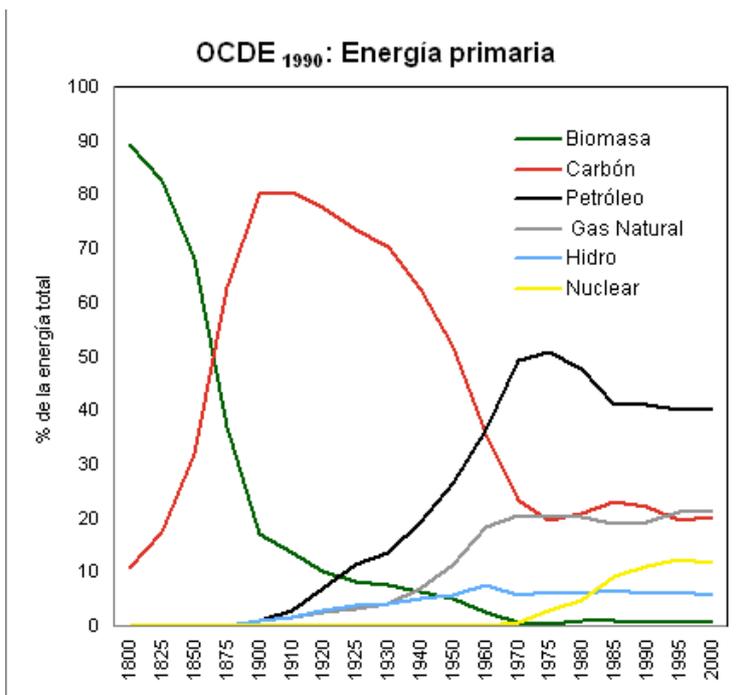
Fuente: Cálculos propios con datos de BP (2010).

Gráfica 3

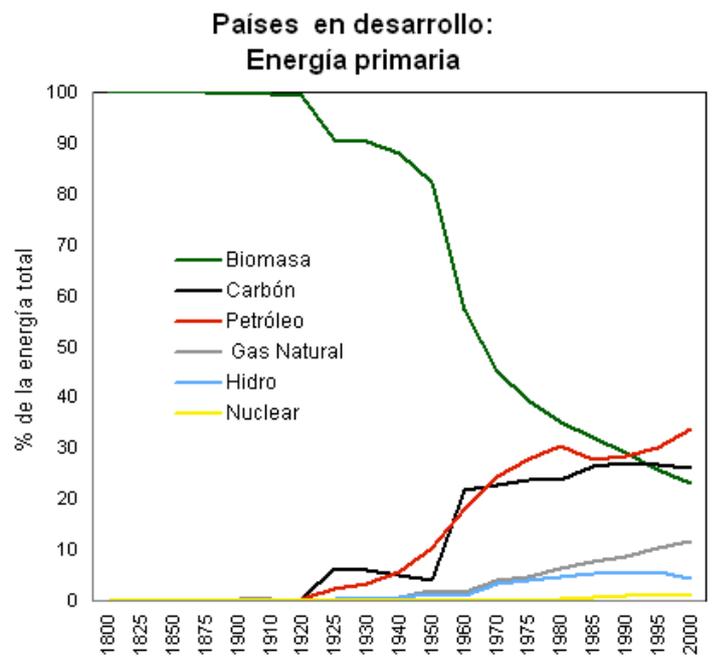


Fuente: Elaboración propia con base en Grübler (2008).

Gráfica 4

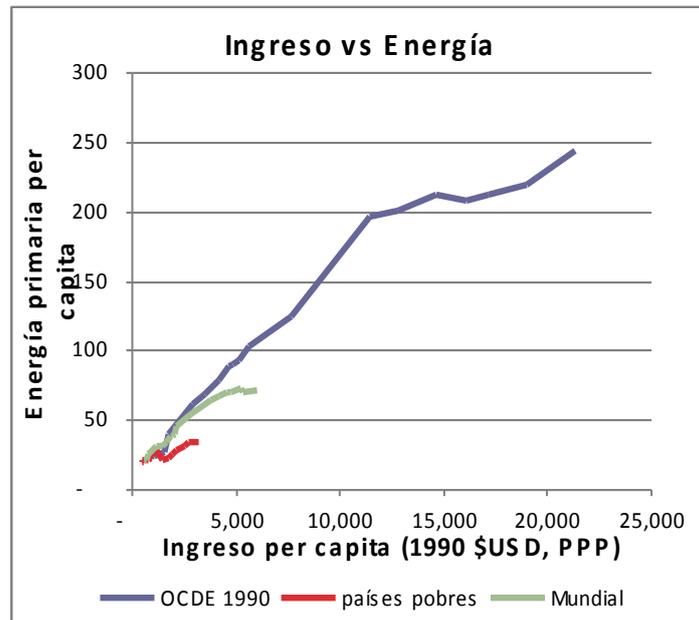


Gráfica 5



Fuente: Elaboración propia con base en Grübler (2008).

Gráfica 6



Fuente: Cálculos propios, con datos de Grübler (2008).