

El final de la era del petróleo barato

IV. DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y NUCLEARES A LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS LIMPIOS Y EFICIENTES DEL SIGLO XXI

Josep Puig i Boix

Icaria/Antrazyt 271, Barcelona, 2007

La era de los combustibles fósiles

La era de los combustibles fósiles representa, en el marco de la historia geológica de nuestro planeta, un minúsculo periodo de tiempo.

Con todos los cambios ocurridos en la Tierra a lo largo de los últimos 10.000 siglos, una cosa ha permanecido inmutable: el hecho de la dependencia de la raza humana respecto del Sol. La única diferencia entre entonces y ahora, es que hemos llegado a ser aun más dependientes del Sol, ya que hoy dependemos de unas fuentes de energía, la mayor parte de las cuales tiene indirectamente un origen solar. Pero esta energía solar acumulada, hace decenas de millones de años en forma de combustibles fósiles, es estrictamente limitada y su duración depende exclusivamente de la velocidad con la cual nuestra sociedad la utilice. Al ritmo actual de consumo, en pocos decenios agotaremos el petróleo y el gas natural, destrozando los mecanismos que regulan el clima de nuestro planeta. ¿Y después, qué?

Para la evolución de cualquier sociedad es de gran importancia la elección que se haga de la base de recursos (materias y energía), pues a través de ellos se controla el ascenso y la caída de las civilizaciones, la libertad o la esclavitud de las naciones, los movimientos del comercio y la industria, el origen de la riqueza y la pobreza, el bienestar de la humanidad, etc. Los que tienen la propiedad de los sistemas energéticos tienen el poder de tomar decisiones y hacer compromisos que afectan a las inversiones, los puestos de trabajo, las compras de equipos, la planificación territorial. Por tanto, tienen un impacto de amplio alcance sobre la economía y la sociedad.

La energía que nuestra sociedad utiliza para producir, distribuir y consumir bienes y servicios es de origen fósil (carbón, petróleo y gas natural). La base material más importante del proceso industrial son las materias primas fósiles (minerales, metales, . . .). Así pues, la economía mundial moderna que se denomina como ilimitadamente abierta (mercado abierto, sociedad abierta), opera en el marco de un sistema limitado o cerrado. La Tierra es un sistema abierto por lo que se refiere a la radiación solar, la fuerza de la gravedad, la radiación cósmica, pero es a su vez un sistema cerrado por lo que se refiere a las materias primas y las fuentes de energía fósiles, el agua, el aire, los suelos. Mientras la economía mundial opere sobre la base de estas fuentes de energía y de estas materias primas fósiles tendrá una perspectiva muy restringida, ya que los recursos fósiles son limitados y la su transformación sobrecarga, daña y destruye los elementos indispensables para la vida en la Tierra (el agua, el aire y los suelos).

El mundo moderno, adicto a los combustibles fósiles

El mundo donde vivimos depende hoy para su funcionamiento de los combustibles fósiles. Sin la energía que nos proporcionan los combustibles fósiles el mundo actual no sería imaginable. Esta dependencia no es nueva. Ya en los inicios de la industrialización, Inglaterra apostó decididamente por el carbón, y todos los países que copiaron el camino de desarrollo industrial, también hicieron del carbón su fuente de energía básica. Todo ello cambió al descubrirse el petróleo. La dependencia del carbón fue substituida por la dependencia del petróleo. Hoy, después de las sucesivas crisis del petróleo, la dependencia del que se denominó 'oro negro', es considerable. Y aún es más considerable la dependencia del mundo actual del conjunto de los combustibles fósiles. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), en el año 2001, un 35% del suministro de energía primaria en el mundo procedía del petróleo, un 23,3% del carbón y un 21,2% del gas natural. Por tanto, el 79,5% del aprovisionamiento energético del mundo, procedía de los combustibles fósiles. El resto, un 20,5%, se reparte entre combustibles renovables y residuos (10,9%), energía nuclear (6,9%), hidráulica (2,2%) y otras fuentes de energía renovable (0,5%).

Podríamos decir que el mundo actual es adicto, o mejor dicho, ha creado una adicción, a los combustibles fósiles, estos combustibles que están en la corteza terrestre, y que no son más que el resultado del secuestro del carbono existente en la atmósfera original de nuestro planeta, hace millones de años. La fosilización de este carbono, en forma de carbón, petróleo, gas natural, esquistos bituminosos i arenas asfálticas, hizo posible que la atmósfera de la Tierra se enriqueciera en oxígeno y se empobreciera en carbono, y como consecuencia, pudiera surgir la vida en nuestro planeta. Pero hoy estemos rehaciendo, en sentido inverso, este camino, ya que nuestra sociedad, fósil adicta, hace posible la quema de los combustibles fósiles en cantidades ingentes y a gran velocidad, liberando enormes cantidades de carbono a la atmósfera (en el año 2002, las emisiones de carbono fueron superiores a 6.400 millones de toneladas, cuando en el año 1950 eran 1.612 millones).

Solamente entre un 0,03% y un 0,04% de los gases que componen la atmósfera de la Tierra es dióxido de carbono (CO₂). Este gas, juntamente con el vapor de agua (del 0 al 2% de la composición de la atmósfera) y otros gases de menor importancia, hacen que la atmósfera absorba parte de la radiación térmica que emite la superficie de la Tierra, cuando se calienta a causa de la radiación solar que recibe. Estos gases que actúan sobre la radiación, se denominan gases de efecto invernadero (GEI), ya que retienen la radiación térmica y hacen que la Tierra sea mas caliente de la que sería sin ellos. En ausencia de los GEI la temperatura mediana de la Tierra sería del orden de -20°C.

Antes de la industrialización, la concentración de CO₂ en la atmósfera era de 278 ppm. El año 2002 ya había crecido hasta 372,9 ppm, un 34% de incremento, cosa que hace que la temperatura media actual del planeta sea 14,52°C, bien por

encima de la que había el año 1950 (13,87°C). A lo largo de los últimos 400.000 años, el clima de la Tierra ha sido bien inestable, manifestándose cambios bien significativos de temperatura, que iban desde clima templado hasta eras heladas en pocas décadas. Estos cambios sugieren que el clima de nuestro planeta es muy sensible a los forzamientos y a las retroalimentaciones climáticas internas y externas. A lo largo de los últimos 10.000 años, las temperaturas han variado bien poco. Con los datos hoy disponibles, es poco probable que la temperatura media global haya variado más de 1°C por siglo, durante estos 100 siglos. Pero hoy la concentración de CO₂ en la atmósfera es ya superior a la que nunca ha habido a lo largo de los últimos 400.000 años. Y si todo continúa igual (desde el año 1950 hasta el 2000, el consumo de combustibles fósiles se ha multiplicado por 4,7), sin cambios significativos por lo que hace al aprovisionamiento de energía del mundo, la concentración de CO₂ en la atmósfera podría llegar a superar la cifra de 600 ppm (más del doble de la que había antes de iniciar la industrialización).

Hoy sabemos que el CO₂ actúa como una trampa de radiación infrarroja, forzando las temperaturas al alza. Hoy sabemos que la concentración de CO₂ en la atmósfera nunca en los últimos 400.000 años había superado la cifra de 300 ppm, hasta que comenzó la locura de quemar combustibles fósiles como si fuesen inagotables. Hoy, hemos constatado que la concentración de CO₂ en la atmósfera va en aumento. Y que si no hacemos nada, la concentración puede llegar a 600 ppm, cuando los nacidos hoy, sean los que habrán de tomar las decisiones en el mundo. Lo que es bien cierto es que el no actuar, nos lleva a la aceleración del cambio climático. La única incertidumbre es a qué velocidad las temperaturas aumentarán y hasta cuándo.

En el mundo, las emisiones de CO₂, en el año 2001, fueron 23.683 millones de toneladas (6.378 millones de toneladas de carbono), es decir, 3,88 tn CO₂/cápita. Como que el Producto Global Bruto, este mismo año, fue de 42.374.340 millones de dólares (del año 1995, habiendo corregido la paridad del poder de adquisición), resulta una eficiencia en CO₂ de la economía mundial de 1.789 \$/tn CO₂ emitida. El país que tiene la eficiencia en CO₂ más elevada del mundo, es Japón (7.621 \$/tn CO₂, en el año 2001), donde el nivel de emisiones es de 8,9 tn CO₂/cápita. Si todas las personas que habitan el planeta Tierra, tuviesen un nivel de emisiones como Japón, resultarían unas emisiones globales superiores a 54.312 millones de toneladas, más del doble de las actuales. De estos datos se desprende que, por más eficiente que hagamos la economía mundial en carbono, no se reducirían las emisiones de CO₂. Por tanto, si hemos de hacer frente al deterioro de los mecanismos reguladores del clima de la Tierra, solamente tenemos una alternativa: ir disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles, hasta llegar a prescindir totalmente de ellos, haciendo nacer una economía libre de carbono fósil.

La energía nuclear: ¿puede ser realmente una alternativa?

Para hacer frente al calentamiento de la atmósfera hay quien ha propuesto la introducción masiva de la energía nuclear, una fuente de energía que se basa en la fisión de un isótopo del Uranio, el Uranio-235, del cual solo un 0,711% se encuentra en el Uranio natural (el 99,28% del Uranio natural es U-238 que no es fisiónable). Además, los minerales de uranio que hoy se explotan tienen un contenido de entre 0,2% y 0,003% en uranio, cosa que hace que se hayan de someter a un proceso de concentración (fábricas de concentrados de mineral de uranio), en el cual se generan (en cantidades ingentes) los denominados estériles de la minería del uranio que contienen el 85% de la radioactividad original del mineral. Este proceso es un proceso muy contaminante, y bien desconocido por la opinión pública.

De hecho, la realidad ha demostrado que la energía nuclear no ha pasado la prueba del mercado, pues donde existe un mercado de energía, mas o menos libre, la nuclear ha necesitado ser tratada con todo tipo de privilegios y tratos de favor para permitir que continuase generando electricidad, ya que los kWh generado con reactores nucleares han demostrado no ser competitivos con otras formas de generación.

Aquellos que proponen la energía nuclear para cubrir las necesidades energéticas del mundo olvidan que la energía nuclear produce únicamente energía eléctrica, y que la electricidad es solo una parte de la energía consumida en el mundo. Hoy la energía nuclear representa solo el 6,9% del suministro de energía primaria en el mundo y el 17,1% de la generación de electricidad (hoy hay en el mundo 437 reactores nucleares para la producción de electricidad, con una potencia instalada de 357 GW). De toda la electricidad generada en el mundo, en el año 2001 (15.476 TWh), 9.982 TWh se generaron con combustibles fósiles (un 38% se generó con carbón, un 18% con gas natural y un 7% con petróleo) y 2.653 TWh con nucleares. El resto, 2.841 TWh, con energía hidráulica y otras renovables.

Veamos que papel podría tener la energía nuclear en la reducción de las emisiones de CO₂. Hoy solo un 17% de la electricidad generada en el mundo es de origen nuclear. La industria eléctrica es responsable del 25% del consumo de combustibles fósiles. El consumo de combustibles fósiles es responsable de las 2/3 partes de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. El CO₂ es responsable en un 50% del calentamiento global. Incluso, si toda la electricidad mundial de origen fosil fuera generada con centrales nucleares, la reducción del calentamiento global sería solo de un 10%. Y ello querría decir la construcción de 1.424 centrales nucleares de 1 GW de potencia cada una.

Para poder disponer del combustible necesario para funcionar estos 1.424 reactores, sería necesario extraer 370 millones de toneladas de mineral de Uranio, para obtener 271.000 tn de tarta amarilla o óxido de Uranio (U₃O₈) mediante las fábricas de concentración del mineral de Uranio (que generarían mas de 640 millones de tn de residuos líquidos y mas de 425 millones de tn de residuos sólidos, que contendrían el 85% de la radioactividad original del mineral, y que permanecerían abandonados durante siglos en las balsa de retención de estériles

a pié de fábrica). La torta amarilla es la base para la fabricación del combustible nuclear, después de su enriquecimiento en el isótopo U-235. Este proceso generaría cantidades ingentes del denominado Uranio empobrecido, que ya hoy es utilizado por la industria de armamento como recubrimiento de proyectiles y bombas (lo que les da un gran poder de penetración). El combustible gastado, después de ser sometido al proceso de fisión dentro del núcleo del reactor (mas de 35.600 tn) contendría 285 tn de Plutonio, con el que se podrían fabricar 28.550 bombas atómicas, si este material fisionable se recuperase en las fábricas de reprocesamiento del combustible gastado, en un proceso altamente contaminante, desde el punto de mira radiológico. En el caso de que el combustible gastado no se reprocesara, entonces el Plutonio permanecería confinado dentro de las barras del combustible. En este caso, será necesario gestionar este producto radiactivo durante 500.000 años (el período de semi-desintegración del Plutonio es de 24.300 años, ello quiere decir que después de este período de tiempo su radiactividad habrá disminuido a la mitad. Para que un producto radiactivo deje de ser dañino para el entorno, es necesario que transcurran 20 períodos de semi-desintegración. Para el Plutonio ello quiere decir casi medio millón de años o 16.666 generaciones humanas).

Querer confiar en la energía nuclear para combatir el calentamiento global del planeta debido a la quema de los combustibles fósiles, a parte de no resolver el problema, significaría poner al mundo en un camino con un enorme riesgo de proliferación nuclear. Si hoy ya se hace difícil controlar el riesgo de proliferación nuclear con 437 reactores nucleares funcionando en el mundo, ¿que podría pasar si funcionasen, además de los ya existentes, 1.424 reactores adicionales?. También querría decir, realizar unas enormes inversiones, dado que el coste de instalación de centrales nucleares es superior a 2.000 Eur/kW. Construir 1.424 reactores significaría unas inversiones de casi 3 billones de Euros. Desde un punto de vista estrictamente energético y económico, hay alternativas mas eficientes por lo que respecta al calentamiento del planeta.

¿Es viable la fusión nuclear?

Hay quien confía en la denominada fusión nuclear. Actualmente, la fusión nuclear puede ser considerada como la fuente de energía mas sofisticada, además de ser una de las que se dedica mas esfuerzo científico. Evidentemente, es la fuente de energía mas complicada, tan complicada que, hasta hoy, nunca nadie no ha sido capaz de demostrar su viabilidad, ni tan solo a nivel experimental.

El principio de la fusión nuclear es muy sencillo. En vez de romper átomos pesados (eso es la fisión nuclear) ahora se trata de juntar átomos ligeros. Tanto en un caso como en el otro hay una gran liberación de energía, debido a la pérdida de masa (1 gr. de masa convertido en energía equivale a la energía liberada por 22.000 tn. de TNT cuando explota, 1 tn TNT equivale a $4,1 \cdot 10^9$ Jouls).

Al tener los núcleos de los átomos de los elementos ligeros, carga eléctrica positiva, cabe vencer grandes fuerzas de repulsión electrostática (la barrera de Coulomb), para conseguir su acercamiento y su fusión dando como resultado un núcleo menos pesado que cada uno de los núcleos fusionados. La mejor forma de conseguirlo es 'calentando', es decir, por agitación térmica; por ello se denomina fusión termonuclear. Pero las temperaturas necesarias son del orden de decenas y centenas de millones de grados: la fusión deuterio – tritio requiere una temperatura de $45 \cdot 10^6$ de grados, y la fusión deuterio – deuterio requiere una temperatura de $400 \cdot 10^6$ grados.

Con estas elevadísimas temperaturas comienzan las dificultades, ya que solo se alcanzan de forma natural en las estrellas (en el Sol, la fusión protón-protón se realiza a una temperatura de $15 \cdot 10^6$ de grados, mas baja debido a la elevada densidad y a la alta población de partículas) y de forma artificial en el corazón de una explosión nuclear. La realidad, hoy por hoy, es que el único ejemplo exitoso de la energía termonuclear es ¡la explosión de la bomba de hidrogeno!, en la cual se alcanza la temperatura necesaria ¡haciendo explotar previamente una bomba atómica de U-235 o de Pu-239!.

Por otro lado cabe considerar que las temperaturas mas altas conseguidas con normalidad en la Tierra nunca no han sobrepasado los 5.000 grados centígrados (¡y se alcanzan mediante energías renovables!, concentrando los rayos del Sol, con ingenios concentradores solares, como el Horno Solar de Odeillo, en la Cerdanya Francesa).

Además de la temperatura, hay otros parámetros importantes que juegan un papel clave en la física de la fusión nuclear: por una parte, la densidad de las partículas que reaccionan en el plasma (n) y por otra el tiempo de confinamiento (t), tiempo durante el cual la reacción puede ser mantenida antes de que los productos se dispersen. En el año 1957, el físico británico Lawson enunció su conocido criterio que rige los mecanismos de la fusión nuclear: el producto de la densidad de partículas (n), por el tiempo de confinamiento (t) ha de ser superior a un valor dado (para la fusión deuterio-tritio ha de ser superior a 10^{14} seg/cm³ y para la fusión deuterio-deuterio ha de ser superior a 10^{16} seg/cm³).

Pero, ¿se han alcanzado alguna vez alguno o todos estos parámetros básicos en alguno de los artefactos empleados en la investigación experimental de la fusión nuclear?. Desde el año 1991, se han producido de forma controlada algunos MW de energía de fusión en experimentos con la reacción deuterio-tritio, realizados en el JET - *Joint European Torus* y en el TFTR - *Tokamak Fusion Test Reactor*. En el año 1997, en el JET, se alcanzó la cifra de 12 MW con un pico de 16,1 MW, pero para alcanzar la temperatura necesaria se hubo de alimentar el experimento con 25,7 MW. De forma estacionaria, en el JET se han alcanzado mas de 5 MW durante 5 segundos, con una producción de energía de 22 MJ. Se necesito una potencia de 24 MW para suministrar una energía de calentamiento de 120 MJ. El controvertido proyecto ITER – *International Thermonuclear Experimental Reactor* pretende ser la continuación de todos estos ingenios.

Ahora bien, para que un reactor de fusión genere mas energía que la que consume, el plasma debería permanecer confinado bien claramente en alguna parte material del reactor durante al menos dos segundos a 150 millones de grados centígrados y a una densidad de $2 \cdot 10^{14}$ partículas por centímetro cúbico. Esta es la concreción del citado criterio de Lawson, para la reacción deuterio-tritio. Se puede concluir que aún se está lejos de alcanzarlo, es decir, de demostrar la viabilidad de la fusión nuclear.

Los físicos nucleares que trabajaban en estos proyectos, optimistas por naturaleza, manifestaban que a comienzos del siglo XXI podrían construir un reactor experimental de fusión y que si tenían resultados exitosos, entonces y solo entonces se podría construir un prototipo de demostración de reactor de fusión termonuclear. Ello se podría alcanzar, según los mas optimistas, a finales de la primera cuarta parte del siglo XXI. Solo entonces será posible hacer una valoración técnico-económica, es decir, comercial, de esta nueva fuente de energía. Los mas optimistas afirman que en el año 2047 se podría iniciar la construcción del primer reactor de fusión nuclear comercial, que estaría acabado en el año 2055.

En el marco de este objetivo se inscribe el proyecto ITER, que son las siglas en inglés de Reactor Termonuclear Experimental Internacional. Bajo estas siglas se reúne un programa de investigación internacional para demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear. A su vez, este experimento quiere proporcionar la información científica y tecnológica necesaria para el desarrollo de un reactor de fusión nuclear de demostración (denominado DEMO).

El ITER no es mas que un proyecto para realizar un experimento que pretende hacer durar la fusión durante unos 100 segundos, para permitir que las partículas de Helio, resultantes de la reacción de fusión, sean la fuente dominante de calor y que la potencia de fusión sea del orden de 100 MW. Hoy ni tan solo se sabe si se podrá hacer funcionar de forma continua. Uno de los objetivos del ITER es aprender a controlar el ciclo del Tritio.

El ITER será una instalación experimental que lleva asociada una descomunal inversión (o un enorme despilfarro, según como se mire). Primero se anunció una cantidad de 3.700 millones de Euros en diez años y posteriormente se aumentó hasta 4.500 millones de Euros (3.500 millones para la construcción a lo largo de 10 años, mas 700 millones de costes asociados), además de unos costes de operación da unos 220 millones de Euros durante 20 años). En toda Europa el lobby político-tecno-científico favorable a la fusión se agrupa hoy dentro de EURATOM – el tratado europeo de la energía atómica (que nació para difundir la energía nuclear en Europa, a la sombra del programa Átomos para la Paz, promovido por los EUA a comienzo de los años 50), que juntamente con la CECA (Comunidad Europea del Carbón y el Acero), hoy inexistente, fueron los dos instrumentos entorno a los cuales nació la Unión Europea actual. El Tratado de EURATOM es hoy muy cuestionado a nivel europeo, proponiéndose desde su

abolición, hasta su profunda revisión, para que deje de hacer tareas de promoción de la energía nuclear y se concentre estrictamente en cuestiones de seguridad nuclear.

Cabría preguntarse si esta forma de gastar es dinero, para un proyecto que ni tan solo se prevé si nunca dará resultados comerciales, es la mejor forma de dedicar recursos públicos a proyectos energéticos, cuando, por ejemplo, a las energías renovables, que ya son una realidad mucho mas cercana, se destinan unas cantidades muy inferiores que las dedicadas a la fusión nuclear.

La no renovabilidad de las fuentes de energía fósil

La adicción a los combustibles fósiles de las sociedades industriales, no solamente pone en peligro la estabilidad climática de los últimos 10.000 años, sino que crea muchos otros problemas, como son su no renovabilidad y la dependencia respecto de las zonas productoras.

La no renovabilidad de los recursos fósiles es un problema de primera magnitud del sistema energético hoy vigente en el mundo. Al ritmo de consumo actual, según *la BP Statistical Review of World Energy*, las reservas de combustibles fósiles durarían: 40 años para el petróleo, 62 años para el gas natural y 216 años para el carbón. Y la consecuencia inmediata, no es tanto su agotamiento físico, sino el momento en el cual la producción haya llegado a su punto álgido y a partir del cual la producción empiece a disminuir y a no poder seguir el ritmo de la demanda. Según muchos analistas del ramo, la industria petrolera podría estar muy cerca de llegar a su punto de máxima producción. Además, se manifiestan hechos suficientemente alarmantes: se constata que los descubrimientos de nuevos yacimientos han disminuido año tras año, que el año 2003 no vio ningún nuevo campo petrolífero de mas de 500 millones de barriles, y que durante los años 2001 y 2002 las 10 mayores compañías petrolíferas no estatales del mundo gastaron mas en exploración que el valor de lo que habían descubierto.

Lo mismo ocurre con los recursos nucleares. Ya en el año 1981, la Comisión Europea alertó de que si los programas nucleares entonces en curso, llegaban a alcanzar los objetivos que se planteaban, habría escasez de uranio, a no ser que se desarrollasen los reactores de neutrones rápidos o reproductores. Estos reactores, que han sido uno de los mas sonados fracasos de la tecnología nuclear, habían de producir mas combustible nuclear (transformando el U-238 en Pu-239 a través de la absorción neutrónica, al disponer de un recubrimiento de U-238 sobre el núcleo del U-235 del reactor) que el que gastaban, pero en realidad nunca han pasado a ser comerciales, debido a sus extraordinarios costes y a los innumerables problemas que presentaban. El ejemplo mas emblemático de este fracaso fue el Super-Phenix francés que hubo de ser abandonado por el gobierno francés.

En el año 2001, las necesidades de Uranio de los reactores en funcionamiento en el mundo eran de 64.329 tn, mientras que la producción de Uranio fue de 36.366 tn, por tanto, la diferencia entre producción y necesidades fue de -27.963 tn. Hasta finales del 2002, en el mundo se habían producido 2.012.414 tn de Uranio y había acumuladas 2.352,55 millones de toneladas de estériles de la minería del Uranio. Y en el enriquecimiento del Uranio en su isótopo U-235 se han generado en el mundo 1.188.573 toneladas de Uranio empobrecido o agotado, que hoy se pone a disposición de la industria militar a un coste nulo, para ser empleado en la fabricación de armamento convencional (recubierto con Uranio empobrecido, pues el Uranio es un metal de una gran dureza y al impactar entra espontáneamente en ignición). En fecha 1 de enero de 2001 había en el mundo unas reservas razonablemente aseguradas y unos recursos estimados adicionales de Uranio (a un coste igual o inferior a 80 dólares) de 3.305.160 tn. Al ritmo actual de consumo sería suficiente para alimentar el parque nuclear actual durante 'solo' 50 años, con el legado de residuos radioactivos de todo tipo generados a lo largo del ciclo del combustible nuclear. Añadir 1424 nuevos reactores al parque hoy existente de 437, significa disponer de uranio para alimentarlos durante ¡12 años!

A esta realidad cabe añadir la problemática asociada al reprocesamiento del combustible nuclear gastado procedente de los reactores de fisión y a la fabricación de combustible nuclear a partir de óxidos mixtos de Uranio y Plutonio (MOX). De todo ello se puede concluir que los depósitos de uranio existentes en el planeta no son suficientes para alimentar durante mucho tiempo un programa nuclear de gran alcance.

La centralización de los sistemas energéticos

Otro problema de los sistemas energéticos es el de la su estructura. El sistema energético vigente es un sistema muy centralizado, con pocas instalaciones generadoras de energía y multitud de usuarios finales, enlazados por una red de conducciones y/o cables. Las cadenas tecnológicas de los combustibles fósiles son enormemente largas. Una cadena tecnológica la forman los sucesivos pasos que se han de cruzar para la transformación de la fuente de energía primaria fósil en energía final disponible para el consumo. Esta enorme longitud hace que, en cada paso se vaya dejando una huella ecológica muy importante: residuos de todo tipo. Estos residuos, en forma de contaminación del aire, del agua y de los suelos, no son otra cosa que un indicador de la poca eficiencia con la que se hacen las correspondientes transformaciones.

La centralización de los sistemas energéticos hace que sean enormemente vulnerables. Se puede poner en evidencia este problema con un claro ejemplo: lo que está ocurriendo con los sistemas eléctricos centralizados. El 14 de agosto de 2003, a las 2 de la tarde, una central térmica (Ohio, EUA, que tenía 31 años de vida) falló. Los operadores de las redes de transporte hicieron todo lo que pudieron para mantener el suministro desde las centrales térmicas situadas en zonas alejadas, cosa que ocasionó una sobrecarga de las líneas. A las 4 y 6

minutos de la tarde, una línea de transmisión de 1.200 MW se fundió, desencadenando un fallo en cascada. Como que no había generación local al alcance, los operadores del sistema fueron incapaces de mantener la tensión y 5 centrales nucleares se desconectaron automáticamente, forzando aun mas la necesidad de buscar electricidad en lugares mas lejanos, sobrecargando las líneas de transporte. A las 4 y 16 minutos la parte nororiental de los EUA y la provincia de Ontario (Canadá) experimentaron un apagón generalizado.

Este gran apagón era el octavo apagón general en siete años, ocurrido en Norteamérica, sin contar otros apagones mas localizados en New York y Chicago. Estos grandes apagones se iniciaron en el año 1996 con el apagón general en 18 estados federales, seguido por la tempestad de hielo del año 1997 en Quebec, que afectó todo el estado de New England, y el tornado del año 1998 que golpeó los estados del medio-oeste de los EUA. Posteriormente, fue el fallo del sistema eléctrico en California, en el año 2000, tres tempestades de hielo en Oklahoma y el apagón general de agosto de 2003.

Los sistemas eléctricos centralizados manifiestan problemas mas profundos que no los repetidos fallos en las líneas de transmisión. Muchas grandes centrales térmicas son considerablemente antiguas (algunas llevan funcionando mas de 25 años), derrochadoras (tienen una eficiencia de conversión de calor en electricidad de solo un 33%) y sucias (50 veces mas contaminantes que la mejor planta de generación descentralizada hoy existente).

La generación eléctrica centralizada, necesitando las feas, y bien visibles, líneas de transmisión, no reciclan su propio subproducto, el calor, o no extraen energía eléctrica, sin necesidad de quemar ningún tipo de combustible, del calor residual de los procesos industriales y de la energía residual. Todo ello hace que haya dos estrategias para hacer frente al problema de los apagones:

- gastar miles de millones de Euros en nuevas líneas, cosa que no eliminará los apagones, pero puede agravar otros problemas,
- ahorrar dinero apoyando a la energía descentralizada. Ello reduciría enormemente la vulnerabilidad del sistema y proporcionaría otros beneficios.

Hoy, en otras partes del mundo, se presenta la gran oportunidad de poder transformar profundamente los sistemas energéticos centralizados, que hemos heredado del pasado. Pero, ¿seremos capaces de hacerlo?. ¿Tendrán el coraje necesario los que toman las decisiones?. Y la ciudadanía, ¿tendrá la visión necesaria para empujar a favor del cambio?

Actualmente existe un gran riesgo que los que ponen las bases para hacer la política energética de un país o de un grupo de países, en su afán de responder a los apagones mediante la incentivación de grandes inversiones en sistemas de generación y transporte centralizados, nos conduzcan a una situación de desastre, ya que si por alguna cosa se van caracterizando estos sistemas es por su

vulnerabilidad en forma de cada vez mas frecuentes apagones generalizados en amplias extensiones de territorios.

Así, en el mes de diciembre de 2003, la entonces Comisaria Europea de Energía y Transporte, Loyola de Palacio, hizo pública su propuesta sobre 'Infraestructuras y Seguridad en el suministro', muy enfocada en grandes inversiones en infraestructuras de transmisión y distribución. Hacía poco (noviembre 2003), que la Agencia Internacional de la Energía (AIE) había publicado el *World Energy Investment Outlook*, donde se preveían que las inversiones necesarias en infraestructuras de transporte y distribución para el año 2030, subirían a la cifra de 5.300 millones de dólares (el equivalente a la tercera parte de todas las inversiones en el sector de la energía o a la mitad de las del sector eléctrico).

Lo mínimo que se puede decir de estas propuestas, y diciéndolo de forma educada, es que son inversiones imprudentes. ¿Por qué? Pues porqué en ellas no se hace ninguna referencia al papel significativo que puede jugar la generación combinada de calor y electricidad de forma descentralizada o cogeneración descentralizada, en mejorar la seguridad de suministro, minimizando los requerimientos de inversiones masivas de capital.

Las inversiones destinadas a reforzar los sistemas centralizados vigentes, son de una gran imprudencia. Hoy no existe ninguna justificación económica, ni de seguridad, ni ecológica para continuar pensando los sistemas energéticos como si nada no hubiese cambiado en los últimos años.

Hoy, el modelo óptimo para asegurar las necesidades energéticas de los próximos 20 años ya no pasa por continuar construyendo grandes centrales térmicas (ni que sean de ciclo combinado) ni por continuar ocupando el territorio con las grandes redes de transporte de energía eléctrica (en corriente alterna) a muy alta tensión. Hoy, el modelo económico y ecológico óptimo pasa por los sistemas energéticos del tamaño apropiado, con la máxima eficiencia posible y cerca de los lugares de consumo. Y cuando se necesite transportar energía entre puntos distantes, utilizar líneas de alta tensión en corriente continua. No hacerlo, tendrá unos enormes costes económicos y ecológicos que ahora estamos a tiempo de evitar.

Los sistemas energéticos del siglo XXI.

El resultado de la batalla que hoy se libra entre un modelo energético centralizado, caduco, obsoleto, ineficiente, vulnerable, sucio y no renovable y el modelo energético naciente, descentralizado o distribuido, eficiente, seguro, limpio y renovable configurará los sistemas energéticos del siglo XXI.

El reto que las modernas sociedades tienen ante si es como facilitar la consolidación del naciente sistema energético, de manera que vaya sustituyendo progresivamente, pero de forma decidida, el sistema que hemos heredado de los siglos XIX y XX.

Parece claro que el sistema energético del siglo XXI acabará basándose en las fuentes de energía renovable, captándolas de forma descentralizada allí donde se manifiestan, para transformarlas y utilizarlas *in-situ*. Las nuevas redes de estos sistemas descentralizados, serán redes múltiples: de electricidad, de calor, de frío, de gas natural biológico y/o fósil, de hidrogeno, etc. También habrá diferentes sistemas de almacenamiento, distribuidos por las redes, los cuales actuarán acumulando los excedentes, cuando la captación de las fuentes renovables supere las necesidades, o suministrando cuando las necesidades sean superiores a lo que producen las fuentes renovables. Serán unas redes, mas en forma de tela de araña, que no unas redes jerarquizadas piramidales. En ellas cada nodo será a la vez generador de energía y usuario de los servicios que la energía proporciona, con lo cual las grandes redes de transporte que han conectado durante el siglo XX las grandes centrales de generación con los centros de consumo alejados de ellas, dejaran de tener sentido, siendo substituidas gradualmente por redes mas locales, interconectadas unas con otras, no para depender de la energía de fuera, sino para intercambiarla, o como medida de seguridad para hacer frente a cualquier emergencia (por ejemplo, en el caso de las redes eléctricas en corriente alterna locales, estarán conectadas unas con otras mediante redes de corriente continua, lo que posibilitará lo que se denomina 'desenfilado' de las redes actuales: menos redes, menos impactos y menos pérdidas por transporte).

No solo la generación de energía se realizará con las tecnologías de generación mas limpias y las mas eficientes disponibles, sino que los usuarios finales de los servicios energéticos utilizaran las tecnologías de uso final mas eficientes que haya disponibles en el mercado.

Un ejemplo de las oportunidades que se nos presentan la tenemos si hacemos un pequeño ejercicio: ver como se pueden cubrir las necesidades de servicios eléctricos a toda la población del planeta, en base a que esta utilice tecnologías de uso final convencionales (a razón de 700 W/cápita) o haga servir tecnologías eficientes (140 W/cápita). En el primer caso se necesitaría generar 37.421 TWh/año, mientras que en el segundo, solo serían necesarios 7.484 TWh/año para cubrir exactamente las mismas necesidades. La situación real en el mundo era que en el año 2001 se consumían 14.197 TWh (o 266 W/cápita), realidad que abre un enorme potencial de ahorro de energía (o lo que es lo mismo, una enorme necesidad de fabricación de artefactos basados en tecnologías de uso final eficientes, que ni tan solo son conocidas en muchas partes de nuestro mundo, y que en otros lugares, no se utilizan con la intensidad que sería de desear).

Generar las cantidades de electricidad citadas en el párrafo anterior, tendrá impactos bien diferentes dependiendo de las tecnologías de generación que se utilicen. Hacerlo con centrales térmicas de carbón convencionales (800 MW de potencia unitaria), o con centrales térmicas de ciclo combinado de gas (400 MW de potencia unitaria) o con centrales térmicas nucleares (1.000 MW de potencia unitaria) repercutirá de forma diferente sobre la Tierra y su biosfera. Ver en la

Tabla 1 el número de centrales termoeléctricas de combustibles fósiles o nucleares que serían necesarias para generar las cantidades de energía requeridas para proveer a la población del mundo con servicios eléctricos, según si los servicios fuesen proporcionados mediante tecnologías de uso final convencionales o eficientes. También en la Tabla 1 se dan las emisiones anuales de CO₂ asociadas para cada tipo de central térmica de combustibles fósiles y la cantidad de combustible nuclear gastado y Plutonio contenido en el combustible gastado, en el caso de centrales térmicas nucleares.

Hacerlo con fuentes de energía renovable, no tendría ninguno de estos inconvenientes, ya que las emisiones de CO₂ serían nulas. Y hoy ya puede ser una realidad, como lo demuestran las centrales solares termo-eléctricas existentes en el desierto de Mojave, California o los miles de MW instalados en parques eólicos existentes en numerosas zonas del planeta. Hacerlo con estas tecnologías significaría disponer de superficie suficiente en lugares suficientemente dotados de Sol y de viento. La potencia necesaria a instalar y las superficies requeridas, en uno y otro caso se dan en la Tabla 2.

Para tener algún punto de comparación por lo que respecta a las superficies citadas en la Tabla 2, solo cabe saber que en el mundo se destinan a diferentes tipos de cultivos las superficies siguientes: 100.000 km² a café, 200.000 km² a patatas, 550.000 km² a soja, 1.500.000 km² a arroz y 2.250.000 km² a trigo.

El transporte de personas y de bienes

Uno de los sectores que mas influencia tiene en las emisiones de gases de efecto invernadero es el transporte. En la Europa de los 25 el transporte de personas y mercancías significó, en 2003, 4,4 billones de personas-km y 1,7 billones de tn-km. Ello significó en promedio mas de 12.000 km/persona durante el año 2003. Un 74% se realizó mediante vehículos automóviles privados, con un incremento de casi el 2% anual. Circulan por las carreteras europeas mas de 212,5 millones de vehículos automóviles y 30,7 millones de vehículos comerciales de transporte, además de mas de 700.000 autobuses y mas de 25 millones de motocicletas, todo ello accionado por derivados del petróleo. El transporte de personas y bienes por carretera significó un consumo final de 284 Mtep (el consumo final de energía de la Europa de los 25 fue de 1.129 Mtep en el año 2003, del cual 343 Mtep se destinaron a transporte de todo tipo). ¿Puede alimentarse un parque automóvil de estas características con carburantes renovables?

Un aspecto importante cuando se debe utilizar un vehiculo equipado con motor que quema alguna clase de carburante, es el tipo de carburante escogido y la eficiencia de la conversión. Hoy, hasta los vehículos convencionales equipados con motores de combustión, pueden utilizar biocarburantes líquidos o gaseosos con pequeñas modificaciones del motor. Es bien conocido el caso de la empresa Volvo, que ya en los años 70 diseñó y construyó unos pocos prototipos de vehículo motorizado (el modelo LC2000), que permitían realizar 50 km por litro de

carburante. Y no solamente eso, si no que el motor podía quemar cualquier clase de carburante y cualquier mezcla de carburantes (tanto de origen fósil, como biológico, incluso aceite crudo, como el que se utiliza para cocinar). Hoy, muchas empresas de coches tienen en su catálogo vehículos equipados con sistemas de bicarburación (gasolina-gas natural) o que directamente queman gas comprimido o licuado, lo que permite la utilización de gas natural de origen biológico (el biogás) que se produce siempre que la materia orgánica (basura, excrementos) se descomponga en ausencia de aire (digestión anaerobia). Todo ello abre la vía para recuperar el biogás que se produce en los vertederos, en las depuradoras, en las granjas, etc. cosa que ya se realiza en algunos lugares del mundo. Por otra parte, los vehículos equipados con motores diesel, con pequeñas modificaciones pueden quemar aceites vegetales crudos i sin modificaciones pueden quemar aceites esterificados. El caso del Centro de Energías Renovables en Dinamarca es conocido, entre otros aspectos, por que sus vehículos hace años que funcionan con aceite crudo de colza.

Hoy, conocidas empresas japonesas han puesto en el mercado coches de accionamiento híbrido (motor de combustión y motor eléctrico), que hacen posible una reducción considerable de las emisiones contaminantes.

Otra tecnología es el motor de hidrogeno. Desde los años 80, unas pocas y pioneras familias norte-europeas generan hidrogeno (hidrolizando agua con electricidad eólica o solar) y lo queman en vehículos motorizados convencionales debidamente adaptados. Hoy, conocidas empresas alemanas ya comercializan coches y autobuses con motor de combustión que utilizan como carburante hidrogeno. Igualmente, los coches de accionamiento eléctrico con electricidad generada en el mismo coche mediante una pila de combustible (que combina electroquímicamente el hidrogeno y el oxigeno, produciendo electricidad y calor) ya han demostrado su viabilidad técnica y diversas marcas ya han presentado sendos prototipos. Islandia anunció, el año 2002, su conversión en una economía basada en el hidrogeno obtenido del agua mediante electricidad limpia y renovable (geotermia). En esto casos se puede hablar de tecnologías limpias siempre que el hidrogeno se obtenga a partir de agua y con electricidad limpia y renovable, haciendo que el coche se convierta en un vehículo sin emisiones contaminantes.

Pero, por mas tecnologías que tengamos al alcance, solo políticas que incorporen de manera sabia la creación de proximidad y fomenten la autolimitación y los comportamientos sensatos en el uso de vehículos motorizados, harán que algún día podamos manifestar que las sociedades humanas tienen sistemas de accesibilidad, que no movilidad, sostenibles.

Para ver el potencial de un carburante renovable, como son los aceites vegetales (colza, girasol, etc.), veamos el caso de Dinamarca. Actualmente tiene un parque automovilístico de mas de 1,9 millones de coches. Suponiendo que dedicara un 25% de su superficie de cultivo al cultivo de la colza (ello representaría 500.000 Ha) y que cada Ha plantada con colza produjera 1.000 litros de aceite, podría alimentar un parque de mas de 1,5 millones de vehículos si ellos fueran de bajo

consumo (p.e. VW Lupo 3L, que por cada litro consumido permite realizar 33 km de recorrido), o un parque de 750.000 vehículos si fueran de consumo medio (15 km/litro), en ambos casos a razón de 10.000 km/año.

Conclusión

Los ejemplos citados anteriormente, no quieren ser un modelo de lo que se debería hacer, simplemente son una cuantificación que ilustra las oportunidades que las sociedades humanas tienen ante sí. Capturar estas oportunidades y beneficiarse de ellas será con toda seguridad el reto de los años venideros. Y aquellas sociedades que lo hagan, bien seguro que tendrán muchas ventajas respecto a las que no sean capaces de hacerlo.

Con toda seguridad el naciente sistema energético descentralizado, eficiente, limpio y renovable no se impondrá de un día al siguiente. Habrá un período de transición, mas o menos largo dependiendo de la voluntad política que manifiesten los que gestionan la cosa pública. Y esta voluntad solo se materializará si la ciudadanía ejerce activamente sus responsabilidades energéticas, en un marco donde se le hayan reconocido sus derechos energéticos básicos.

En este período de transición, se emplearan aun combustibles fósiles, pero ello se realizará con la máxima eficiencia posible (tecnologías descentralizadas de generación combinada de electricidad, calor y/o frío) y con los combustibles fósiles menos sucios (gas natural fósil), mientras se vayan abandonando las grandes centrales térmicas basadas en carbón, petróleo y nucleares.

Los derechos energéticos básicos necesarios para consolidar un sistema energético descentralizado o distribuido, eficiente, seguro, limpio y renovable son:

- El derecho a saber el origen de la energía que cada uno utiliza,
- El derecho a saber los efectos ecológicos y sociales de los sistemas energéticos que hacen posible el suministro de energía a cada usuario final de servicios energéticos,
- El derecho a captar las fuentes de energía que se manifiestan en el lugar donde se vive,
- El derecho a generar su propia energía,
- El derecho de acceso justo a las redes,
- El derecho a introducir a las redes la energía generada *in-situ* y
- El derecho a una remuneración justa por la energía introducida en las redes.

Estos derechos deben ir acompañados de un conjunto de responsabilidades:

- La responsabilidad de informarse,
- La responsabilidad de exigir información,
- La responsabilidad de generar la energía con las tecnologías de generación más eficientes i más limpias disponibles y al alcance,

- La responsabilidad de utilizar las tecnologías de uso final de la energía más eficientes y al alcance,
- La responsabilidad de utilizar la energía generada con sentido común y evitando derroches de todo tipo,
- La responsabilidad de autolimitarse en el uso de cualquier forma de energía,
- La responsabilidad de ser solidario con aquellas sociedades más desfavorecidas por lo que respecta tanto a la generación como al uso final de la energía.

Garantizar estos derechos debería ser una de las tareas a las cuales los gobiernos otorgaran la más absoluta prioridad. Ejercer estas responsabilidades debería ser considerado como el deber primordial de las personas responsables que vivimos en un planeta donde el Sol es la fuente de energía de la cual dependemos. Adecuar los estilos de vida a los flujos de la energía solar (energía solar directa y sus formas indirectas) es un aprendizaje, que cuando más pronto se vaya realizando, menos costes de todo tipo deberán soportar los humanos para poder ir viviendo en las sociedades que han creado en el marco de este bonito planeta que nos acoge, pues las sociedades humanas siempre han necesitado, necesitan y necesitaran energía para vivir dignamente en el planeta Tierra.

Tablas

Tabla 1. Comparación de las necesidades de generación eléctrica y las unidades de generación necesarias (centrales térmicas de carbón, centrales térmicas de ciclo combinado de gas y centrales nucleares), las emisiones y los residuos que se generarían, a nivel mundial, según si la población hiciera servir tecnologías de uso final convencionales o eficientes, y las unidades necesarias en la situación actual, si toda la energía se generase en un solo tipo de centrales.

	Tecnologías	de uso	Final
	convencionales	eficientes	real (año 2001)
Energía (TWh/any)	37.421	7.484	14.197
C.T. Carbón (800 MW)			
Número de unidades	6.675	1.335	2.532
CO ₂ , Mtn	33.080	6.616	12.550
C.T.C.C. Gas (400 MW)			
Número de unidades	13.349	2.670	5.065
CO ₂ , Mtn	12.910	2.582	4.898
C.T.Nucleares(1000 MW)			
Número de unidades	5.340	1.068	2.026
Comb.gastado, tn	133.494	26.699	50.646
Plutonio, tn	1.068	214	405

Fuente: elaboración propia, a partir de 'IEA Energy Statistics – Energy Indicators'.

Tabla 2. Comparación de las necesidades de generación eléctrica y necesidades de potencia de generación a instalar (centrales termo-solares y parques eólicos) y ocupación superficial, a nivel mundial, según si la población hiciera servir tecnologías de uso final convencionales o eficientes, y las necesidades actuales si toda la energía se generase en un solo tipo de tecnología.

	Tecnologías	de uso	Final
	convencionales	eficientes	real (año 2001)
Energía (TWh/any)	37.421	7.484	14.197
Centrales solares			
Potencia a instalar (MW)	12.205.120	2.441.024	4.630.457
Ocupación (km ²)	235.559	47.112	89.112
Emisiones CO ₂ (tn)	0	0	0
Parques eólicos			
Potencia a instalar (MW)	14.239.307	2.847.861	5.402.199
Ocupación (km ²)	142.393	28.479	54.022
Emisiones CO ₂ (tn)	0	0	0

Fuente: elaboración propia, a partir de 'IEA Energy Statistics – Energy Indicators'.

Bibliografia

- Autores varios. Energías Renovables para todos. ISBN: 84-933488-0-X. Madrid: Energías Renovables, 2003.
- Ayres, E. & Scarlott, Ch.A. Energy Sources: The Wealth of the World. Library of Congress Catalog Card Number: 51-12558. New York: McGraw-Hill, 1952.
- Bertell, R. No Immediate Danger: Prognosis for a Radioactive Earth. ISBN: 0-7043-3934-1. London: The Women's Press. 1985.
- Butti, K. & Perlin, J. A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology. ISBN: 0-7145-2730-0. London: Marion Boyars Publishers Ltd., 1981.
- Caldicott, H. The New Nuclear Danget: George W. Bush's Military-Industrial Complex. ISBN: 1-56584-740-7. New York: The New Press. 2002.
- Casten, T.R. & Collins, M.J. Optimizing Future Heat and Power Generation, WADE – World Alliance for Decentralized Energy, 2002.
- Flavin, Ch. & Lenssen, N. Power Surge: Guide to the Comming Energy Revolution. ISBN: 0-393-31199-6. New York and London: W.W.Norton & Co., 1994.
- Gofman, J.W. & Tamplin, A.R. Poisoned Power: The Case Against Nuclear Power Plants Before and After Three Mile Island. ISBN: 0-87857-288-0. Emmaus, PA: Rodale Press. 1979.
- Grenon, M. The Nuclear Apple and the Solar Orange: Alternatives in World Energy. ISBN:0-08-026156-6. Oxford:Pergamon Press Ltd, 1981.
- Hubbard, A.; Fong, C. Community Energy Workbook: A Guide to Building a Sustainable Economy. ISBN:1-881071-04-9. Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute, 1995.
- Lovins, A. At al. Small is profitable, Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute, 2003.
- May, J. The Greenpeace Book of the Nuclear Age: The Hidden History, The Human Cost. ISBN: 0-575-04567-1. London: Victor Gallancz Ltd. 1989.
- Meissonnier, M. et al. Uranium Appouvri: la guerre invisible. ISBN: 2-221-09431. Paris: Éditions Robert Laffont. 2001.
- Morris, D. Self-Reliant Cities: Energy and the Transformation of Urban America. ISBN:0-87156-296-0. San Francisco: Sierra Club Books. 1982.
- Morris, D. Be Your Own Power Company: Selling and Generating Electricity from Home and Small-Scale Systems. ISBN:0-87857-478-6. Emmmaus, PA: Rodale Press, 1983.
- Mumford, L. Técnica y Civilización. ISBN: 84-206-2011-4. Madrid: Alianza Editorial, 1982.
- Patterson, W. Transforming Electricity: The Comming Generation of Change. ISBN: 1 85383 341 X. London: Earthscan Publ. Ltd., 1999.
- Perlin, J. From Space to Earth: The Story of Solar Electricity. ISBN: 0-937948-14-4. Ann Arbor, MI: aatec publications, 1999.
- Puig, J. 'El cicle del combustible nuclear'. Cabré, O. et al. Catalunya sota el perill de l'urani: l'informe CAMON-I, ISBN: 84-297-1767-6, Barcelona: Edicions 62, 1981 (Llibres a l'abast, 165).

- Puig, J. 'La mineria de l'urani i la fabricació de concentrats', Cabré, O. et al. Catalunya sota el perill de l'urani: l'informe CAMON-I. ISBN: 84-297-1767-6, Barcelona: Edicions 62, 1981 (Llibres a l'abast, 165).
- Puig, J. 'La tecnologia nuclear: una fita en el camí cap al control de les comunitats', Medina, M. (ed.). Noves tecnologies: risc i alternatives, ISBN: 84-7410-273-1, Barcelona, Publicacions de la Fundació Jaume Bofill – Edicions de la Magrana, 1986.
- Puig, J; Corominas, J. La ruta de la energia. ISBN: 84-7658-244-7. Barcelona: Editorial Anthropos, 1990.
- Puig, J. "L'energia a les ciutats: una reflexió i una guia d'acció". Papers de Sostenibilitat (Barcelona), 4 (desembre 2001), 1 – 39.
- Scheer, H. Estrategia Solar: Para el acuerdo pacífico con la Naturaleza. ISBN: Barcelona: Círculo de Lectores, 1993.
- Scheer, H. Economía solar global: estrategias para la modernidad ecológica. ISBN: 84-8109-315-7. Barcelona: Galaxia Gutenberg/Círculo de Lectores, 2000.

Web's de interés:

- www.antenna.nl/wise
- www.energiasostenible.org
- www.localpower.org
- www.rmi.org
- www.ucsusa.org
- www.worldwatch.org