

POR QUÉ NO CONSIGO SOÑAR CON EL HIDRÓGENO SOLAR

Eduardo Lorenzo
Instituto de Energía Solar
Universidad Politécnica de Madrid

Introducción

A lo largo de su historia, los humanos hemos desarrollado una amplia diversidad de tecnologías para procurarnos energía. La sucesión de estas tecnologías es vista por muchos como un sendero de progreso creciente que, tarde o temprano, debe conducir a la panacea de una fuente de energía prácticamente ilimitada y, además, no contaminante. La combinación de energías renovables e hidrógeno, las primeras como fuente y el segundo como vector de transporte, está recibiendo mucha atención en los medios de comunicación, quienes, más o menos conscientemente, la presentan como esa panacea.

El actual presidente de la Unión Europea, Romano Prodi, decidido promotor de esta alternativa, ha llegado a decir que espera ser recordado por dos cosas: la ampliación de la Unión Europea a los países del Este y el desarrollo de un nuevo modelo energético basado en el hidrógeno. A ello le anima el tener como asesor a Jeremy Rifkin, presidente de la “Fondation on Economic Trends”, con sede en Washington, autor de libros que gozan de amplia difusión, como *Entropía* (Ed. Urano, 1990) o *La economía del hidrógeno* (Ed. Paidós, 2001), y de quien se puede decir que es un apóstol de esta alternativa.

Alberto Ruiz Gallardón, reciente vencedor en las elecciones a la alcaldía de Madrid, incluyó en su programa electoral la futura conversión a hidrógeno de todos los autobuses de la ciudad, y el presidente de los EE.UU., George Bush, en el discurso sobre el estado de la nación del pasado mes de febrero, prometió 1,7 billones de dólares (billones americanos, de 10^9) para el desarrollo de la tecnología del hidrógeno, que él llama “freedom fuel” (combustible libre) y que pretende obtener principalmente del gas natural.

El hidrógeno fue el tema central del Encuentro Solar de Benicarló - 2003¹. Los grupos de investigación activos en células de combustible se multiplican por doquier.

Los humanos tendemos a desarrollar estructuras intelectuales, que se nos antojan correctas para explicar el cúmulo de nuestras experiencias vitales. Tales estructuras funcionan como cánones preestablecidos donde vamos colocando los nuevos avatares que nos trae la vida. Esto es muy útil para la vida cotidiana (si no dispusiéramos de estas pautas preestablecidas, tendríamos que estar continuamente repensándolo todo, y la vida sería entonces terriblemente cansada), pero nos hace propensos a la cerrazón frente a otras realidades. Un libro clásico sobre la teoría de sistemas señala acertadamente que “*incluso los investigadores profesionales, que debieran mostrarse siempre dispuestos a cambiar sus estructuras de pensamiento, muestran la misma tendencia a distorsionar la percepción del mundo, en vez de combatir los cánones mentales que utilizamos para orientarnos*”². Pues bien, uno de los cánones más ex-

¹ Una versión preliminar de este artículo, con el mismo título, se presentó en este encuentro.

² Peter Checland, *Systems Thinking, Systems Practice*, A-11. John Wiley & Sons, West Sussex, Inglaterra, 1999.

tendidos es la creencia de que la Ciencia puede encontrar soluciones para todo. La fe en esta idea creció muchísimo a partir del siglo XIX, cuando la explotación de las fuentes de energía fósil posibilitó el desarrollo de muchas novedades, que fueron interpretadas esencialmente como adelantos científicos, obviando las consecuencias del mucho consumo de energía que implicaban. En la actualidad esta fe mantiene su vigor, aunque muchos añaden la condición de que, para que la Ciencia pueda rendir sus beneficios, debe ser liberada del influjo, entendido siempre como pernicioso, de los “intereses creados”. El maridaje entre el ansia de energía³ y este canon es tierra bien abonada para la proliferación de expectativas que van más allá de lo razonable y que, por tanto, están condenadas al incumplimiento, y a la frustración de quien se empeña en cultivarlas.

Cánones, expectativas irrazonables y frustraciones cuentan, de hecho, con una larga tradición en los asuntos energéticos. Bien conocidos son los intentos de construir “móviles perpetuos” que proliferaron en el Renacimiento. Sobre ellos dijo Leonardo Da Vinci: “...entre las desmedidas e imposibles creencias de los hombres se encuentra la búsqueda del movimiento continuo, también llamado por algunos rueda perpetua...”⁴ El comentario resulta muy perspicaz, cuando se piensa que es casi cuatro siglos anterior a la comprensión de las leyes de conservación de la energía, que establecen la imposibilidad de estos artefactos. También explicó el destino final de los inventores de tales prodigios: “...y después de grandes gastos, no logrando poner en marcha sus máquinas, se veían obligados a ponerse en marcha ellos precipitadamente y a cambiar de aires..”. Sin embargo, la sabia advertencia de Leonardo siguió siendo desoída. Entre 1855 y 1903, en Inglaterra se concedieron cerca de quinientas patentes de aparatos de movimiento perpetuo, y una locura similar barrió toda Norteamérica hasta que, en 1911, la Oficina de Patentes de los Estados Unidos declaró que a partir de entonces todas las solicitudes de máquinas de movimiento perpetuo habrían de ir acompañadas de modelos que funcionasen⁵.

Aunque con matices no tan nítidos, y evitando los atentados frontales contra las leyes de la termodinámica, se podría decir que la larga y fútil búsqueda del movimiento perpetuo prosigue en la actualidad. A comienzos de la década de los 50, se anunció que la energía nuclear inundaría el mundo, con el reclamo de que llegaría a ser tan barata que no merecería la pena instalar contadores en las viviendas para medirla. La realidad posterior fue bien diferente, y la energía nuclear, aun siendo importante en algunos países, no ha pasado de generar anualmente 6 EJ de electricidad en todo el mundo, es decir, unas cuatro veces menos de lo que representa el consumo de biomasa⁶ –principalmente leña en los países pobres–. Tiene interés recordar la sincera confesión que en el año 1978, cuando las limitaciones de la energía nuclear comenzaban a ser evidentes, hacía uno de sus protagonistas: “...Así, he vivido una de las más apasionantes tentativas del espíritu humano. ¡Y cuánta generosidad había en todas nuestras acciones! En todas nuestras experiencias, cuántas promesas –ingenuas, pero nunca indignas– de una vida mejor y más rica para todos. Hoy se olvida que nuestros “pecados” no eran a me-

³ Una buena imagen del consumo actual de energía se obtiene considerando que el consumo de energía primaria en España (121 537 ktep en el año 2000) equivale a 85 400 kcal por habitante y día, es decir, unas 40 veces más que las dos mil kilocalorías que, como promedio, necesitamos para vivir.

⁴ Leonardo Da Vinci, *Códices de Madrid*, Biblioteca Nacional,

⁵ G. Basalla, *La evolución de la tecnología*, págs. 96-98. Ed. Crítica, 1991.

⁶ V. Smil, *General Energetics, Energy in the Biosphere and Civilization*, pg. 189. John Wiley & Sons, 1991.

nudo más que errores. Quizás éramos egoístas, pero sinceros. Creíamos. Y es duro admitir que quizás nos hemos equivocado. Pero, ¿ hasta qué punto? y ¿ cuánto? ⁷

Y tampoco la energía solar ha escapado de la tentación de anunciar imposibles milagros. En el año 1978, el Departamento de Energía de los Estados Unidos anunció que las llamadas capas delgadas permitirían reducir el coste de los módulos fotovoltaicos a sólo 0,6 \$ por vatio, y que ello ocurriría a mediados de la década de los 80. El anuncio, procedente de una instancia tan relevante y hecho público en un momento en que el precio de los módulos de silicio cristalino rondaba los 20 \$/W, despertó grandes expectativas. Desde entonces han sido muchísimos los investigadores que se han dedicado al tema de las capas delgadas, y bastantes los intentos de producirlas industrialmente. Sin embargo, la realidad es que este enorme esfuerzo no ha pasado de tener más que muy magros resultados. Aunque han pasado más de 25 años de aquel anuncio, el precio de los módulos fotovoltaicos basados en capas delgadas no es inferior al de los módulos convencionales de silicio cristalino, su cuota de mercado no es más que marginal, y las deserciones han comenzado a mermar las filas de sus defensores. En enero de 2003, BP Solar, una empresa de gran solvencia en el mercado fotovoltaico, anunció el cierre de todas sus factorías de capa delgada, y su presidente declaraba que *“una capa delgada competitiva, no ha sido inventada todavía...”*⁸

Todos estos anuncios tienen en común el olvido de las dificultades que siempre conlleva pasar del papel a la realidad, y la impresión de que algo así está ocurriendo en torno a la combinación hidrógeno y energías renovables es el principal motivo de este artículo. Para resaltar esas dificultades, se presenta aquí un sencillo análisis de la relación, en términos energéticos, entre los beneficios que reporta y la inversión que exige la cadena tecnológica que permitiría utilizar hidrógeno como combustible y obtenerlo a partir de generadores fotovoltaicos. El resultado es que, sólo para sustituir los productos petrolíferos consumidos en España en el año 2000 sería preciso instalar, como poco, 366 GW, y habría que inmovilizar un capital superior a los dos billones de euros. Para asegurar la rentabilidad de este capital, el coste del combustible sería equivalente a más de 3 euros por litro de gasolina en la actualidad.

Caza, agricultura... fósiles, energía solar

Este artículo comenzó señalando que, a lo largo de su particular camino evolutivo, el “Homo sapiens” ha ido variando sus modos de obtener energía. Ahora es oportuno preguntarse por las razones y las reglas que gobiernan los cambios de un modo a otro.

A modo de ejercicio iniciático, podemos comparar las características energéticas de la caza de un mamut, tal y como la practicaban los “neandertales”, con las del cultivo de trigo, tal y como lo hacían los antiguos egipcios. Para ello, consideraremos que en una jornada de trabajo esforzado, el consumo energético de un hombre es de 4000 kcal.⁹ El primer parámetro a estimar será la *rentabilidad energética* de la actividad, entendida como la razón entre las energías

⁷ Michel Grenon, *La pomme nucléaire et l'orange solaire, réflexions sur les choix energetiques*, pg. 55. Editions Robert Laffont, París, 1978.

⁸ Declaraciones de Harry Shimp, presidente de BP Solar. Photon International, 1/2003.

⁹ En realidad los consumos energéticos normales raramente superan las 3000 kilocalorías diarias. La utilización de una cifra más elevada responde a que los resultados del ejercicio no tengan una apariencia exagerada. Por lo demás, la utilización de un valor u otro, es irrelevante a los efectos de lo que aquí se trata.

extraída e invertida en ella. Ello resulta una buena medida de la relación entre el beneficio que obtiene y el esfuerzo que debe realizar quien la practica. La tabla 1 presenta los detalles del ejercicio, del que resulta que la caza primitiva era unas 15 veces más rentable que la agricultura tradicional. Así, no es de extrañar que los hombres prehistóricos insistieran en aquella actividad y no se animaran a convertirse en agricultores, hasta que la extinción de los grandes herbívoros no les dejó otra salida.

Actividad	Caza	Agricultura
Supuesto	Caza de un mamut de 4 T	Cultivo de 1 Ha y preparación del pan
Esfuerzo	7 cazadores durante 5 días	1 trabajador durante un año
Beneficio	2 600 kg de carne y grasa (30 MJ/kg)	3 T de grano (16 MJ/kg)
Rentabilidad energética	$\frac{2,6 \times 10^3 \text{ kg} \times 30 \text{ MJ/kg}}{7 \times 5 \times 16,5 \text{ MJ}} = 135$	$\frac{3000 \text{ kg} \times 16 \text{ MJ/kg}}{365 \times 16,5 \text{ MJ}} = 8$

Tabla 1. Características energéticas de la caza prehistórica y la agricultura tradicional.

El lector puede entretenerse con otros ejercicios (particularmente sorprendente es la caza de la ballena, cuya rentabilidad puede llegar a más de 3000 veces), o establecer otros supuestos que juzgue más razonables. Como quiera que sea, verá entonces que la disminución de la rentabilidad energética con cada cambio de actividad es una ley sin excepción, que se aplica a la Historia en su generalidad. La generación de electricidad es buen ejemplo de que tal es así en la actualidad. Por ejemplo, una central térmica tarda, en el mejor de los casos, no menos de 5 años en devolver la energía que se invierte en su construcción y operación, mientras que su vida operativa no va más allá de 30 años; por lo que su rentabilidad energética es, como mucho, del orden de 6 veces.

Otro parámetro de interés es la *densidad energética superficial* de una actividad, entendida como la relación entre la energía extraída y la superficie de terreno que exige. Los mamut comían mucho pasto. En consecuencia, precisaban de mucho terreno para alimentarse y, obviamente, trasladaban esta exigencia a sus depredadores humanos, limitando su densidad. Dependiendo de la climatología del lugar (la hierba crece más cuanto más llueve), las estimaciones –ejercicios asociados se dejan al cuidado del lector– hablan de entre 1 km² y 20 km² por persona. Por el contrario, la agricultura permite sostener hasta 5 personas por Ha, es decir, un par de órdenes más de magnitud.

Así pues, el cambio de la caza a la agricultura permitió crecer mucho a las poblaciones del “Homo sapiens”, pero al precio de que los individuos trabajasen mucho más. Las cifras de la población mundial, que ya ha superado los 6000 millones de personas, y los discursos de los políticos, que apelan continuamente a la necesidad de incrementar la productividad, son síntomas claros de que tales tendencias han perdurado a lo largo de la Historia y de que se mantienen incólumes en la actualidad.

El análisis de las ventajas e inconvenientes de una actividad no se agota cuantificando sus parámetros energéticos. Otros factores, como el riesgo, la seguridad de suministro, etc. son

también importantes, aunque su consideración está fuera de las pretensiones de este trabajo. Nos limitaremos a algún comentario relativo a la *complejidad de la organización* asociada a cada actividad:

Los cazadores necesitan poco más que el acuerdo de unos cuantos para la apertura de trampas, el ojeo, el descuartizamiento y el traslado a la cueva de la carne del animal. Casi todos los que participan en la caza lo hacen en pie de igualdad. Los agricultores, sin embargo, precisan de una organización mucho más compleja, que deriva de la necesidad de realizar grandes inversiones fuera del alcance de los individuos (construcción de canales para riego, silos de almacenamiento, etc.), de garantizar la sostenibilidad (definición de la propiedad de la tierra, etc.), y de la especialización intrínseca de la actividad (agricultores propiamente dichos, ganaderos, artesanos, leñadores, etc.). De aquí se deduce que los cambios de actividad energética van aparejados de un incremento de la complejidad social. Se podrá argüir, y con razón, que la organización social no está únicamente determinada por la obtención de energía; por ejemplo, los cazadores tienen también que cuidar de sus crías, enfermos y ancianos (los “neandertales” ya lo hacían, e incluso enterraban a sus muertos). Pero cabe poca duda de que la estructura energética influencia poderosamente la estructura de las sociedades. Y esto debe hacernos sospechar que lo que, en un sentido amplio, se entiende por cultura y progreso social también es, en buena medida, fruto de la necesidad.

En resumen, se puede concluir que la razón que motiva los cambios energéticos es el agotamiento de las fuentes disponibles. Y respecto de las reglas que regulan los cambios se puede concluir que cada nuevo modo de obtener energía, comparado con el anterior, comporta una peor relación beneficio/esfuerzo, una organización más compleja y un incremento de la densidad energética.

La progresiva disminución de la relación beneficio/esfuerzo, que en otros contextos se llama *ley de los rendimientos decrecientes*, es particularmente importante aquí. En la opinión de este autor, los “errores” de los anuncios descritos en el apartado anterior (nuclear, capas delgadas, etc.) se deben precisamente a que las correspondientes propuestas tecnológicas intentaban saltarse esta ley. Y hay que decir que la postura de quien los comete es totalmente comprensible, debido a que la cabal aplicación de la ley no es inmediata. Por un lado, porque hay muchas situaciones coyunturales en las que puede no cumplirse (por ejemplo, si a los cazadores de mamut de nuestro ejemplo se les hubiera escapado la presa) y, por otro, por la dificultad que entraña la comparación de actividades que no son necesariamente equivalentes. Así, si se analiza la relación beneficio/esfuerzo del transporte, resulta que andar en bicicleta conlleva una relación mejor que andar a pie –por eso una persona puede recorrer más de 200 km al día en bicicleta, mientras que es difícil pasar de los 50 km a pie–, pero la bicicleta requiere de caminos, que habría que contabilizar en términos de la energía necesaria para construirlos y mantenerlos, y además impone una grandísima restricción espacial –en bicicleta no se puede subir al Everest–. Además, la aplicación de la ley es particularmente difícil cuando se alumbra una nueva tecnología, porque a la gran incertidumbre propia de cualquier estreno se suma el que los investigadores involucrados en ella tienen otras preocupaciones más inmediatas (el autor lo sabe por propia experiencia).

La rentabilidad energética de la tecnología fotovoltaica

Si la ley importa aquí es porque hace pensar que la actual tecnología fotovoltaica, basada en el silicio cristalino, está llamada a perdurar en el futuro. Esta tecnología es frecuentemente denostada como cara, pero en realidad tiene muchos atractivos. El silicio es un material natural, abundante y los módulos no dejan residuos incómodos al final de su vida útil. Su precio refleja en buena medida la cantidad de energía que es necesario invertir en su fabricación, y que es equivalente a 5600 kWh de electricidad por cada kW de potencia nominal¹⁰, a los que hay que sumar otros 900 kWh/kW asociados al resto del sistema (estructuras de soporte, obra civil, transporte, inversores, protecciones, etc.), lo que da un total de 6500 kWh/kW. En el supuesto de aprovechar toda la electricidad que producen los sistemas fotovoltaicos, como es el caso cuando se conectan a la Red, es razonable suponer para la productividad anual en España un valor medio de 1200 kWh/kW¹¹.

De lo anterior resultaría que un sistema fotovoltaico conectado a la Red tardaría 5,5 años (6500/1200) en devolver la energía invertida en su producción. Ahora bien, en la fabricación de equipos no se puede utilizar directamente la electricidad que sale de los sistemas fotovoltaicos, porque ésta es variable y aleatoria. Hay que pasar por algún tipo de almacenamiento intermedio como, por ejemplo, el intercambio con la Red. La penalización energética que esto representa se puede estimar como una eficiencia del 75 %, lo que eleva el tiempo de recuperación energética a 7,3 años. Suponiendo una vida útil de 40 años, esto representa una relación beneficio/inversión ligeramente superior a 5 veces ($40/7,3 = 5,5$), la cual, a mi entender, es coherente con lo que puede esperarse para una tecnología posterior a los combustibles fósiles, a la luz de la regla de las relaciones beneficio/inversión decrecientes, mostrada en el apartado anterior.

Precisamente, es esta coherencia la que me lleva a creer que la tecnología de silicio cristalino se mantendrá estable en el futuro. Y también a creer que la probabilidad de que toque la lotería, en forma de invento revolucionario que cambie sustancialmente el panorama actual, no es superior a la de que toque el “gordo” en el sorteo de Navidad. En vez de ello, creo, asistiremos a una sucesión de pequeñas innovaciones (oblas más delgadas, eficiencias un poco mejores, estructuras de soporte más ligeras, etc.) que irán optimizando gradualmente la tecnología actual para reducir su coste (energético y económico) hasta, quizás, un 65 % del actual (3400 kWh/kW para los módulos⁸ y 900 kWh/kW para el resto del sistema). Esto puede conducir a que la relación beneficio/inversión llegue a 8,4, y ésa es la mejor “muleta” con la que contaremos para “lidar”. Aunque no dejaré pasar la ocasión de expresar mi deseo de estar equivocado en estas apreciaciones, y de que el futuro depare a mis hijos una alternativa mejor.

Por otro lado, para que un sistema energético sea sostenible, debe reinvertir una parte de la energía que produce (lo que hasta aquí hemos llamado, bastante impropriamente, beneficio), con el fin de compensar la energía invertida en su construcción. Por ello, la energía realmente liberada para el uso que se desee es menor que la producida. En la figura 1 se describe esta situación.

¹⁰ K. E. Knapp and T. L. Jester, *Energy Balances for Photovoltaic Modules: Status and Prospects*. 28th IEEE PV Specialist Conference, Anchorage, 2000.

¹¹ Esta cifra es representativa de configuraciones estáticas. Es posible superarla con estructuras capaces de seguir al Sol como, por ejemplo, las que incluye la central de 1,2 MW Tudela-PV. Pero tales estructuras requieren más hierro y más cemento para su construcción, lo que limita su influencia en un escenario energético.

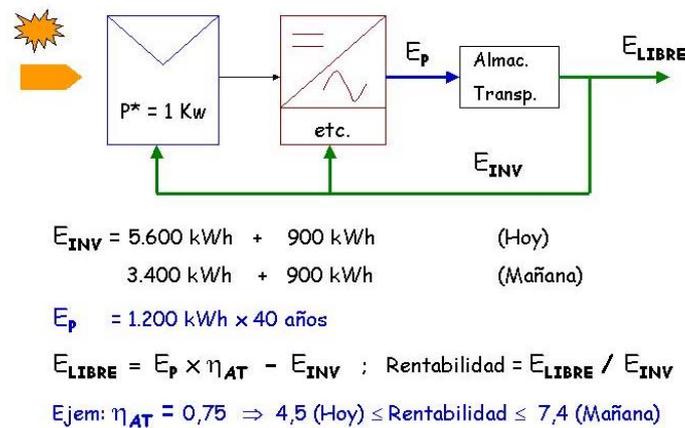


Figura 1. Rentabilidad energética de la tecnología fotovoltaica actual.

En términos más precisos, la *rentabilidad energética*, r_e , de la tecnología fotovoltaica, entendida como la relación entre la energía liberada para el uso que se desee, E_{LIBRE} , y la energía invertida para construir la cadena de equipos que la produce, E_{INV} , viene dada por:

$$r_e = \frac{E_{LIBRE}}{E_{INV}} = \frac{E_P}{E_{INV}} \eta_{AT} - E_{INV} \quad (1)$$

donde E_P es la energía entregada por los sistemas fotovoltaicos y η_{AT} es la eficiencia de la cadena que transporta y almacena la energía desde los sistemas fotovoltaicos hasta un punto en el que pueda utilizarse sin restricciones. Por ejemplo, si se utiliza la red eléctrica convencional como tal cadena (como así ocurre en la actualidad con los generadores fotovoltaicos conectados a ella), se puede estimar que la eficiencia es $\eta_{AT} = 0,75$ (las pérdidas de transporte y distribución en la red actual son del 12 %, y la cadena debería pasar dos veces por ella: una desde los sistemas fotovoltaicos hasta los elementos con los que intercambia energía y otra al contrario). Considerando, otra vez, que la productividad energética de los sistemas es de unos 1200 kWh/kW y que su tiempo de vida útil es de 40 años, se deduce que la rentabilidad energética es $4,5 \text{ (hoy)} \leq r_e \leq 7,4 \text{ (futuro)}$.

Este asunto de la rentabilidad energética encierra mucha envidia. En él radica, en última instancia, el elevado coste de la electricidad fotovoltaica. Al menos de momento, no cobran a nadie por ponerse al sol, de forma que se puede interpretar que la energía solar (la flecha amarilla a la izquierda de la figura) es gratis. Pero lo que no es gratis es la energía que hay que invertir en los equipos que convierten la energía solar en energía libre. Es más, tal inversión hay que hacerla toda por adelantado (al contrario de lo que ocurre, por ejemplo, con una central térmica). Y, precisamente, ahí está el drama. Porque resulta que invertir hoy “1” para no obtener más que “5” a lo largo de 40 años es equivalente a una tasa de interés del 4 %. En la realidad, la tasa de interés que correspondería a una inversión fotovoltaica, que pretendiera resarcirse sólo con la energía producida, sería todavía menor (la realidad contiene elementos que “cuestan” y que no han sido incluidos en el escenario: comercialización, financiación,

mantenimiento, etc.), quizás inferior al 2 %. Esto resulta muy poco atractivo para el capital en el contexto del mercado actual.

En resumidas cuentas, la electricidad fotovoltaica es rentable energéticamente, y por eso puede entenderse como elemento constituyente de un futuro sostenible; pero no es rentable económicamente, y por eso su desarrollo no puede fiarse sólo a los mecanismos del mercado.

Hidrógeno fotovoltaico

Lo que sigue a continuación es un análisis basado en un modelo que, seguramente, muchos calificarán de excesivamente simplista, por lo que es oportuno comenzar citando otra vez al clásico de la teoría de sistemas: “*La tentación siempre es empeñarse en la construcción de modelos muy elaborados; es una actividad más confortable que la de enfrentar los modelos a las asperezas de la realidad*”.¹²

En términos simples, el análisis de la cadena energética asociada a un ciclo de hidrógeno alimentado por generadores fotovoltaicos puede hacerse suponiendo que toda la energía invertida en la construcción de los sistemas fotovoltaicos proviene, precisamente, del final de la cadena, es decir, de las células de combustible que convierten el hidrógeno en electricidad. Esta situación está representada en la figura 2, junto con las eficiencias supuestas para cada elemento de la cadena: electrolizador ($\approx 80\%$), compresión y transporte del hidrógeno ($\approx 80\%$), y célula de combustible ($\approx 60\%$). Entonces la ecuación (1) puede aplicarse con $\eta_{AT} = 0,384$, y manteniendo el resto de los datos utilizados en el análisis anterior, se llega a que la rentabilidad energética para la tecnología esperable en el futuro (la que consume sólo 4300 kWh/kW) es $r_e = 3,3$, y a que la energía libre cada año, por cada kilovatio de generador fotovoltaico, es $E_{LIBRE} = 353$ kWh.

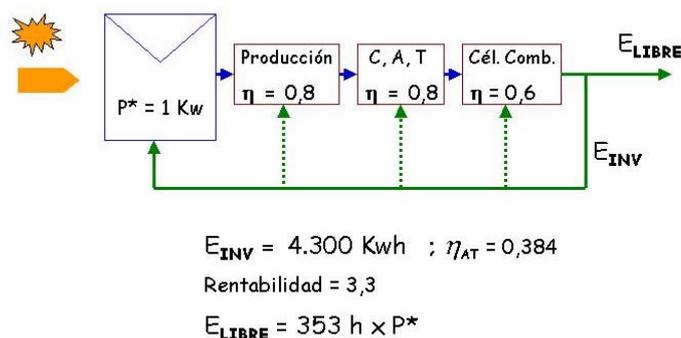


Figura 2. Rentabilidad energética del hidrógeno fotovoltaico.

¹² Peter Checland, *Systems Thinking, Systems Practice*, pg. 177. John Wiley & Sons, West Sussex, Inglaterra, 1999.

El supuesto de extraer toda la energía invertida del final de la cadena puede ser tildado, y con razón, de pesimista, puesto que en un sistema energético integrado, como el que representa la red eléctrica, la energía para la producción de los generadores fotovoltaicos podría extraerse de otros eslabones de la cadena energética, con menor penalización en términos de eficiencia. No obstante, esto afecta poco al resultado final del ejercicio, ya que este supuesto pesimista está compensado por otros claramente optimistas. En particular, por la no consideración de la energía necesaria para producir el resto de los elementos de la cadena analizada: electrolizadores, compresores, células de combustible, etc.

Hecha esta consideración, se puede analizar, a modo de ejemplo representativo, el caso hipotético de sustituir por hidrógeno de origen fotovoltaico los productos petrolíferos (gasolina, diesel, etc.) que se consumieron en España en el año 2000, y que totalizaron una energía final de 55 575 ktep¹³. Con una eficiencia promedio de conversión en energía mecánica del 20 %, la energía libre equivalente (es decir, la energía mecánica entregada por los motores a las ruedas de los coches) asciende a

$$55575 \text{ ktep} \times 0,2 \times 10^7 \frac{\text{kcal}}{\text{tep}} \times 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \times \frac{\text{kWh}}{3600 \text{ kJ}} = 12924 \times 10^7 \text{ kWh}$$

Suponiendo ahora que los motores eléctricos (que convierten la electricidad que sale de las células de combustible en energía mecánica que entregan a las ruedas de los coches) trabajan sin pérdida ninguna, es decir, con eficiencia unidad, la energía eléctrica que deberían producir anualmente los generadores fotovoltaicos sería:

$$12924 \times 10^7 \text{ kWh} \times \frac{1200}{353} = 43934 \times 10^7 \text{ kWh}$$

para lo que, suponiendo de nuevo una productividad anual de 1200 kWh/kW, se necesitaría que la potencia nominal instalada alcanzase la cifra de 366 GW, es decir, casi cuatrocientas mil centrales como la de Toledo-PV.

Entender lo que representa esta cifra se logra, por ejemplo, imaginando que la capacidad anual de producción fotovoltaica española, que hoy es cercana a los 70 MW, pudiese crecer al 30 % anual durante muchos años, y que toda ella se dedicase al objetivo de tal sustitución. El resultado es que, entonces, se tardarían 28 años en lograrlo. De otra manera, asumiendo un coste de 4 euros/W de sistema fotovoltaico, habría que inmovilizar cerca de un billón y medio de euros (billones españoles, es decir, de 10¹²). A modo de comparación con otros escenarios, es de interés señalar que los 366 GW calculados aquí suponen más de 600 veces los 580 MW que propone alcanzar ASIF para el año 2030.

Obviamente, estos ejercicios no deben tomarse al pie de la letra. Ningún escenario es una predicción del futuro; es sólo un entretenimiento de cálculo que indica lo que ocurriría si se hiciesen algunas cosas que en la práctica no se van a hacer. Por ejemplo, en el caso que nos ocupa, es impensable destinar toda la producción española de módulos fotovoltaicos a la sustitución de productos petrolíferos. Entre otras cosas, ello supondría detraer los que ahora se destinan a la electrificación rural en los países pobres –aproximadamente la mitad de la pro-

¹³ Foro Nuclear, *Energía 2001* (Disponible en www.foronuclear.org).

ducción total—, lo que reduciría el esfuerzo, ya de por sí escaso, empeñado en la cooperación internacional al desarrollo, agravaría la pobreza y, con ella, los problemas de la inmigración ilegal, que tanto eco encuentran entre las preocupaciones del español medio. Igualmente, es impensable que el capital se dedique sin más a invertir en este asunto. Para asegurarle rentabilidad habría que imponer precios de combustible muy superiores a los actuales, lo que llevaría automáticamente a perder las elecciones a cualquier partido que incluyese tal alternativa en su programa. Por si no fuera poco, habría también que renovar toda la infraestructura que mantiene el actual transporte por carretera: gasolineras, talleres de coches, etc., y reeducar a la mayoría de sus empleados. Por último, habría además que mantener constante la demanda de automoción¹⁴.

Así pues, por razones más sociales que tecnológicas, la realidad sería mucho más difícil de lo que indica el ejercicio, y esto quiere decir que, en la práctica, los plazos necesarios para sustituir los actuales combustibles fósiles por energías renovables serán mucho más largos que la treintena de años estimada aquí.

Por otro lado, es poco probable que los sistemas fotovoltaicos lleguen a reducir su precio hasta los 4 euros/W. Entre otras razones, porque buena parte de su coste actual es reflejo de la inversión de energía que requieren, y el precio de la energía muy probablemente subirá antes de los próximos treinta años. Por ello, es seguramente mucho más realista estimar para los sistemas fotovoltaicos un precio de 6 euros/W y, para el resto de los elementos de la cadena (electrolizadores, compresores, tuberías, etc.), un precio equivalente a 2 euros/W.

El coste unitario de la energía resultante, p_e , en el sencillo supuesto de considerar nulos los costes de explotación y mantenimiento, y en ausencia de préstamos con interés u otros mecanismos financieros, viene dado por la expresión:

$$p_e = \frac{P^* C_i (A/D, r_d, N)}{E_F}$$

donde P^* es la potencia nominal de los generadores fotovoltaicos; C_i es el precio unitario de la cadena energética; $(A/D, r_d, N)$ es la anualidad correspondiente a un capital inicial unidad, durante un periodo de N años, y a una tasa de descuento r_d , y E_F es la energía final liberada anualmente.

En el ejemplo que nos ocupa, suponiendo que el capital se amortiza en 30 años y a una tasa de descuento de sólo el 3 %, $P^* = 366 \times 10^6$ kW, $C_i = 6000$ euros/kW, $(A/D, 3\%, 30) = 0,0510$ y $E_F = 12\,924 \times 10^7$ kWh. El resultado es $p_e = 0,87$ euros/kWh. De otra manera, si la expresión anterior se utiliza con $E_F = 55\,575 \times 10^3$ tep, y se considera que el contenido energético de un litro de gasolina es aproximadamente 10^{-3} tep, se llega a la conclusión de que el coste del hidrógeno fotovoltaico sería equivalente a 2,14 euros por litro de gasolina.

Para facilitar al lector la construcción de sus propios escenarios, la tabla 2 contiene valores del parámetro $(A/D, r_d, N)$, para el espectro de situaciones más representativo:

¹⁴ A modo de contraste, el consumo español de productos petrolíferos creció un 3,4 % desde 1999 a 2000.

r_d (%)	N (años)		
	20	25	30
2	0,0612	0,0512	0,0447
3	0,0672	0,0574	0,0510
4	0,0736	0,0640	0,0578
5	0,0802	0,0710	0,0651

Tabla 2. Valores del parámetro (A/D , r_d , N).

Por ejemplo, si se considera que el capital se amortiza en 30 años pero al 5 % (todavía por debajo de las hipotecas actuales), y además se incluye un 20 % de impuestos (hoy son más del 60 %), y otro tanto de operación y mantenimiento (operarios de las estaciones de servicio, etc.), el coste de la energía sería equivalente a 3,8 euros por litro de gasolina. O sea, posible pero muy caro.

Ahora viene la pregunta de ¿por qué insistir en la tecnología fotovoltaica cuando hay otras, como la eólica, que son más baratas? La respuesta tiene que ver con la cantidad de energía disponible a la entrada de los correspondientes sistemas energéticos, es decir, con el tamaño de la flecha amarilla de la izquierda de las figuras 1 y 2, que es verdaderamente enorme comparado con cualquier otra posibilidad que quepa imaginar. Por ejemplo, los 366 GW calculados anteriormente ocuparían bastante menos del 1 % de la superficie de España. Es decir, que la ejecución de un plan tan ambicioso como que todos los vehículos españoles funcionasen a base de sol, requeriría utilizar menos del 1 % del potencial de la energía solar. Como comparación, el potencial de la energía eólica, en el contexto de su rentabilidad actual, es tan pequeño que, al día de hoy, cuando los parques eólicos no han llegado a generar ni el 5 % de la electricidad que se consume en España, ya no quedan muchos sitios “buenos” donde puedan instalarse máquinas. Hay otros sitios, pero en ellos es menor la velocidad media de viento, y mucho menor aún la energía que producen los generadores eólicos, cuya potencia está relacionada con el cubo de la velocidad del viento. Es decir, el potencial de la energía eólica está siendo agotado con rapidez. Y algo así, simplemente, no puede ocurrir con la energía solar, por lo que, tarde o temprano, no habrá más remedio que recurrir a ella. Esta idea, presentada aquí como fruto de analizar una aplicación particular, aparece reiteradamente en el camino de muchos otros ejercicios de prospección del escenario energético, por lo que cabe la presunción de que su validez sea general.

Parece claro que, de no mediar un milagro, algún día habrá que restringir mucho la costumbre de ir en coche al trabajo. Y también que, a pesar de las maravillas que pueda esconder la tecnología del hidrógeno, las opciones tradicionalmente consideradas como alternativas (ahorro, bicicleta, etc.) mantienen todo su valor.

Epílogo

La combinación de energías renovables, como fuente de energía, con el hidrógeno, como vector de transporte, está levantando muchas expectativas, como posible alternativa al actual modelo energético, basado en los combustibles fósiles. Su protagonismo en los medios de comu-

nicación, en los anuncios de personajes relevantes en la política y en los planes públicos de investigación está siendo cada vez mayor.

Sin embargo, el análisis de la relación entre la energía que puede producir y la que exigiría su construcción –que en este artículo se ha analizado mediante un ejemplo representativo– sugiere que el coste y las dificultades de implantar un modelo energético basado en esta cadena serían, de hecho, muy elevados. Tanto que, en opinión de este autor, la probabilidad de que la transición desde el modelo energético actual a la nueva alternativa se produzca sin solución de continuidad y sin sobresaltos, es muy pequeña.

También es opinión de este autor, que una razón de mucho peso en la actual promoción de esta cadena energética deriva del carácter fuertemente centralizado que, casi seguramente, asociaría la producción y manejo del hidrógeno. En este sentido, el nuevo modelo se parecería mucho al modelo energético actual, y su implantación no exigiría cambios sociales significativos. Las actuales compañías que controlan los negocios del petróleo y de la electricidad podrían, con ligeros maquillajes, seguir controlando los negocios del hidrógeno. Es decir, el nuevo modelo respeta los “intereses creados” en el modelo energético actual, y en ello reside su principal atractivo, ya que su promoción no enfrenta resistencias importantes, como las que sí enfrentan otras aplicaciones más descentralizadas de la energía solar. Por ejemplo, la conexión a la red eléctrica de sistemas fotovoltaicos individuales, que todavía es muy difícil en España.

Hay que apresurarse a señalar que la defensa de los intereses creados no encierra ribetes de particular maldad. Más bien, es algo consustancial a la esencia de los humanos, como muy bien explicó Maquiavelo: *“Digo pues, que en los Estados hereditarios y acostumbrados al linaje de su príncipe la dificultad de conservarlos es bastante menor que en el caso de los nuevos, puesto que es suficiente con respetar el orden de sus antepasados y, por lo demás, adaptarse a los acontecimientos; de esta forma, si el príncipe en cuestión es de una habilidad normal, conservará siempre su Estado...”* (“El Príncipe”, capítulo II).

Y después de esta cita no hay más que decir que bien pudiera ser que las dificultades presentadas aquí no están más que en la imaginación del autor, y que la realidad futura sea mucho más fácil, bien por que el petróleo vaya a durar mucho más de lo que se dice, o bien porque toque la lotería en forma de milagro tecnológico que rompa la ley de los rendimientos decrecientes (léase que de una vez acierten los chicos de la fusión nuclear, o los de las células solares de tercera generación, o...). ¡Ojalá sea así!