

El hidrógeno: un camino al barranco

IVÁN SÁEZ GARCÍA

Ingeniero técnico industrial

Introducción

El tan cacareado hidrógeno (H_2), que desde hace décadas asalta los canales publicitarios de forma intermitente, sorprende por una cosa: a pesar de que la tecnología necesaria para desarrollarlo está disponible desde mediados del siglo xx (en el peor de los casos), no se acaba de implantar. La razón es simple: afronta muchísimos más problemas que los que nos cuentan y la realidad se impone a la promesa de subvenciones.

El hidrógeno no es una **fuentes** de energía, sino un **vector** energético (como la electricidad o el vapor), una forma de almacenar y transportar energía, no de producirla. La publicitada *sociedad del hidrógeno* sería equivalente a la sociedad del vapor: primero necesitas una fuente de energía para producirlo.

Para obtener hidrógeno hay que *arrancárselo* a las moléculas de las que forma parte, empleando energía en el proceso. Luego obtendremos de él mucha menos que la que hemos empleado en *liberarlo*. Si sacamos hidrógeno del agua para acabar quemándolo generando agua, si no se perdiese energía de por medio, estaríamos ante una versión electroquímica del *perpetuum mobile*.

Se proponen tres usos para él: mezclarlo en las conducciones de gas natural, como combustible de nuestros vehículos y como almacén de energía renovable. El tercer uso consistiría en producir hidrógeno con aquella energía renovable que, por problemas de estabilidad, no se pudiese verter a la red; luego, se quemaría en turbinas de gas para generar electricidad cuando no tuviésemos suficientes fuentes renovables disponibles (como una noche sin viento). Sin embargo, este tercer uso requiere una escala mucho mayor que los otros dos para ponerse en juego y está afectado por los mismos problemas, incluso



agudizados. Es por esto que el autor juzga que no llegará a implantarse ni mínimamente y, por lo tanto, no se desarrolla en este artículo.

Propiedades del hidrógeno

El hidrógeno está lleno de propiedades inconvenientes para funcionar como vector energético. Merece la pena evaluar las tres que siguen en conjunto:

1. **Fugacidad extrema:** se cuela por cualquier poro, huelgo o fisura con suma facilidad. Recipientes estancos para otros gases no lo son con el hidrógeno.
2. **Difunde en materiales ligeros:** se cuela entre sus moléculas, para él son una especie de membrana semipermeable. Es decir, un recipiente de fibra de carbono fugaría, literalmente, por sus paredes.
3. **Fragilizador de metales:** reacciona con ellos generando hidruros, degenerando su estructura y reduciendo su resistencia. Es decir, un recipiente de acero a presión acabaría reventando con el tiempo.

De las propiedades anteriores se colige que los recipientes y conducciones para almacenar y transportar hidrógeno a presión serán intrínsecamente complejos, muy exigentes y muy caros. En la realidad, combinan una capa de metal para evitar la difusión y otra de un derivado del petróleo para aguantar la presión. Huelga decir que sus requerimientos de mantenimiento son elevados y demandan inspecciones frecuentes.

Sin embargo, la peor propiedad de todas, la más importante de cara a nuestro análisis y su principal talón de Aquiles, es esta:

4. **Densidad bajísima:** no la hay más baja, pues está compuesto por los átomos más ligeros que existen (peso atómico = 1). A 20 °C y 1 bar¹ es de 0,083 kg/m³ (701% de la del aire). Sin comprimir, un kilo de hidrógeno ocupa 12 m³ (un camión cisterna pequeño). No importa que por unidad de masa el hidrógeno tenga un PCI² mejor que el de los combustibles fósiles (33.300 Wh/kg contra 12.000 Wh/kg del gasóleo), pues en el mismo volumen apenas hay masa. Un litro de gasóleo contiene 10.200 Wh/l; en un litro de hidrógeno tenemos 2,8 Wh/l. Una jarra de agua llena de

¹ El bar es la medida de presión estándar en la industria y equivale a un kilo por centímetro cuadrado. Es casi igual a una atmósfera (el 98,7%), así que el lector puede pensar en atmósferas si lo prefiere.

² Poder calorífico inferior. Es la energía calorífica que obtenemos al quemar una molécula si el agua que también se genera en el proceso se escapa en estado gaseoso (no condensa). Es la que aprovechan todos los motores de combustión y las calderas que no son de condensación.

gasóleo guarda la misma energía que un tanque de 3.600 litros lleno de hidrógeno sin comprimir.

Por lo tanto, no queda otra que comprimirlo. Muchísimo: 700 bar es la presión de uso estándar en automoción, con la que obtenemos 1.300 Wh/l (13% del gasóleo). Otra mala noticia: cuanto más ligero es un gas, más cuesta comprimirlo. Vamos a gastar una cantidad de energía notable en comprimir H₂ a 700 bar. Usando compresores multietapa, los más eficientes, consumiremos alrededor del 14% de su PCI (comprimir gas natural requiere unas ocho veces menos energía).

Licuarlo no es una solución. Aunque en estado líquido su densidad siempre será superior que a presión, sigue siendo extremadamente ligero: 70 kg/m³ (el agua pesa 1.000 kg/m³). Además, para licuar H₂ hay que gastar una cantidad de energía tremenda: típicamente, valores en torno al 30-35% del PCI para enfriarlo a -253 °C, su temperatura de licuefacción. Estamos hablando de un líquido criogénico³ extremo necesitado de unos aislamientos térmicos extremos y con elevadas pérdidas por ebullición espontánea. Todo esto descarta esta vía, así que no la vamos a comentar más.



Obtención del hidrógeno

La industria produce decenas de millones de toneladas de H₂ al año, fundamentalmente para sintetizar amoníaco (NH₃), que a su vez se usa para componer fertilizantes. ¿Y de dónde lo saca? Pues del gas natural (del cual, por lo tanto, dependen nuestras cosechas), a través de un proceso llamado «reformado por vapor» que se suele continuar con otro denominado «conversión agua-gas», con un rendimiento combinado que supera ligeramente el 70%. El 95% del H₂ producido hoy en día en el mundo viene del gas natural (incluyendo el de la mayoría de las estaciones de servicio piloto).

El problema es que dicho proceso no es limpio en absoluto. Para producir 1 kg de hidrógeno gastas unos 5-6 l de agua dulce y también obtienes 9-10 kg de CO₂. Las tecnologías de captura, tratamiento y secuestro de CO₂ no son una opción real a gran escala, porque implican un enorme gasto energético que reduce sensiblemente los rendimientos e incrementa notablemente los costes, con lo que este artículo las descarta. Por lo tanto, los coches de hidrógeno actuales por supuesto que contaminan: 9,5 kg de CO₂ por cada kilogramo de hidrógeno

³ Un líquido criogénico es aquel que permanece en dicho estado a una temperatura inferior a los 153 °C bajo cero. No se pueden refrigerar por métodos convencionales, así que fuera de la máquina que los produce van «hirviendo» en el interior de sus depósitos fuertemente aislados, que actúan como termos para evitar que se calienten.

consumido contando solamente la producción del combustible (luego hay que comprimirlo y transportarlo, y el coche hay que fabricarlo).

¿Y la electrólisis?⁴ Hoy en día es absolutamente marginal por algo tan pro-saico como los costes: no puede competir con la producción por gas natural. Respectivamente, 5-8 €/kg contra 1-3 €/kg. En los años treinta del siglo xx el hidrógeno se producía fundamentalmente por electrólisis alcalina, pero llegó la tecnología del gas natural y la barrió.

La electrólisis tampoco es inocua. En primer lugar, consume agua dulce, la cual deja de ser apta para otros usos, porque el agua pura conduce mal la electricidad, así que hay que añadir aditivos que lo faciliten, como potasa y sosa cáusticas o ácido sulfúrico. Por cada kilo de hidrógeno producido necesitas «desintegrar» 9 litros de agua, procesos auxiliares aparte. No podemos usar agua de mar directamente porque la sal común interviene en la reacción, generando sosa cáustica (NaOH) y cloro gas (Cl₂). Hay fábricas dedicadas a esto (proceso cloro-alcalí) y el hidrógeno que producen lo queman *in situ* para reducir la factura del agua. No podemos superar la capacidad industrial para absorber ambos compuestos, pues la NaOH envenenaría los mares y el Cl₂ alimentaría la lluvia ácida y las afecciones respiratorias a través de compuestos perjudiciales como el ácido clorhídrico y el dióxido de cloro.

El rendimiento de una cuba de electrólisis no es brillante. El de las históricas, baratas y robustas cubas alcalinas no llega al 70%. Ciertas tecnologías en desarrollo prometen acercarse al 80%, pero usan multitud de materiales caros o escasos y duran menos. Las PEMEC⁵ requieren platino, iridio, polisulfonas patentadas como el naftión y el teflón, oro y titanio. Las SOEC⁶ usan todo un festival de tierras raras y metales poco abundantes (itrio, lantano, cerio, gadolinio, cobalto, manganeso, circonio, rutenio, estroncio, titanio y cromo; no todos a la vez, depende de la tecnología empleada).

Transporte del hidrógeno

Si hoy en día las estaciones de servicio no se suministran mediante una red de oleoductos y gasoductos, mucho menos se hará con el hidrógeno. Un

⁴ La electrólisis consiste en romper una molécula aplicando una corriente eléctrica continua. Las cubas de electrólisis constan de dos electrodos (aplican la corriente eléctrica), un electrolito (donde se halla la molécula que queremos romper) y una membrana que separa en dos partes el conjunto. En nuestro caso, se electroliza agua (H₂O) para obtener hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂). Si la electricidad empleada viene de fuentes limpias, es un proceso poco contaminante.

⁵ Proton Exchange Membrane Electrolytic Cell: «cuba de electrólisis de membrana de intercambio de protones».

⁶ Solid Oxyde Electrolytic Cell: «cuba de electrólisis de óxido sólido».

«hidroducto» es mucho más caro de construir y mantener, y está sometido a pérdidas más elevadas. Transportar hidrógeno por tuberías demanda aproximadamente ocho veces más energía que el gas natural.

Nos queda la carretera, pero la ligereza del hidrógeno lo complica todo sobremanera. Un tráiler grande de gasóleo puede cargar 30.000 l (26 t). Su equivalente de hidrógeno solo cargaría 450 kg presurizado a 250 bar (máxima presión autorizada). Si se aprobasen tráileres a 500 bar, podríamos subir la cantidad transportada a 780 kg. En todos los casos estamos hablando de camiones de 35-40 t, pues los depósitos de hidrógeno pesan mucho debido a sus características. Además, un tráiler de H₂ a 250 o 500 bar, por motivos técnicos y de seguridad, no consiste en un solo depósito, sino en varios pequeños apilados, lo cual disminuye el volumen útil y aumenta el peso significativamente.

En términos de PCI transportado, mientras la cisterna de gasóleo contiene 305 MW, los depósitos de hidrógeno llevarían 15 MW a 250 bar y 26 MW a 500 bar. Es decir, para transportar la misma energía que ahora tendríamos que multiplicar por 20 y 12, respectivamente, el tráfico de camiones.

El consumo de la cabeza tractora pasaría a ser algo a tener muy en cuenta. El tráiler de gasóleo, en 100 km puede consumir unos 35 litros, es decir, el 0,1% de su carga. El camión de hidrógeno consumiría unos 7-8 kilos en la misma distancia (el 1,7% de su carga a 250 bar y el 1,0% a 500 bar). Si nos vamos a 500 km, los porcentajes suben al 0,6%, 8,3% y 4,8%, respectivamente, solo ida. Con el hidrógeno no nos podemos ir lejos, pues las pérdidas se vuelven inasumibles.

¿Cómo montamos una red eficiente de transporte, intercambio y suministro de hidrógeno bajo estas condiciones? Todo esto acaba forzosamente en un mayor precio de venta al consumidor final y, si se encarece el transporte, se encarece el precio de los artículos de primera necesidad.

Mezcla con gas natural

Este uso es un despropósito, porque, por desgracia, el hidrógeno:

1. Es mucho más caro de producir, transportar, licuar y comprimir que el gas natural.
2. Contiene mucha menos energía a volúmenes iguales que el gas natural.
3. Fragiliza, fuga y difunde.

Si metemos hidrógeno en una tubería de gas natural:

1. Disminuimos el poder calorífico de la mezcla en alrededor de un 7% por cada 10% en volumen añadido. Tendremos que consumir más gas para



obtener el mismo calor, con lo que, al final, el ahorro de gas natural se queda en un 3% por cada 10% de H₂ añadido.

2. Encarecemos notablemente el recibo, pues la mezcla es más cara intrínsecamente y, encima, incrementamos el consumo de metros cúbicos.
3. Aumentan los costes y problemas de mantenimiento.

Es obvio: si un metro cúbico de gas natural a 20 °C y 1 bar tiene un PCI de unos 10 kWh/m³, el del hidrógeno son unos 2,8 kWh/m³. En el interior de un gasoducto de distribución urbano a 16 bar las proporciones son muy similares: 158 frente a 44 kWh/m³. Es decir, el mismo gasoducto entrega, lleno de hidrógeno, el 30% de la energía por segundo que entregaría lleno de gas natural, salvo que aumentemos el caudal. Simplificando, por cada 10% de hidrógeno que añadimos arañamos un 7% de poder calorífico.

¿Cómo le explicamos a la clase trabajadora que vamos a entregarle en sus cocinas y calderas una mezcla de peor calidad a cambio de bastante más dinero?



Automoción

El vehículo de hidrógeno es un vehículo **eléctrico**. La diferencia con el convencional es que produce la electricidad internamente en su célula de combustible,⁷ no hace falta enchufarlo a la red. Sin embargo, las células no admiten variaciones bruscas de carga, tan comunes al conducir. Para absorberlas y compensarlas se usan baterías, así que no nos libramos de este elemento que tan desfavorable le resulta al vehículo eléctrico enchufable. Eso sí, son bastante más pequeñas: alrededor de una cuarta o quinta parte.

Las células de combustible son el elemento clave que permite que pueda pensarse en un vehículo de hidrógeno. La opción de quemarlo directamente en motores de gasolina adaptados daría unos rendimientos globales muy inferiores a los de los vehículos térmicos actuales, luego no tiene sentido.

Las células de combustible en uso tienen rendimientos teóricos que llegan al 60%, pero las variaciones de carga y otro tipo de consideraciones hacen que su rendimiento real ronde el 55%. Una vez descontadas otras pérdidas (eléctricas, mecánicas, auxiliares...) y sumada la energía recuperada en desaceleraciones por las baterías, el rendimiento global del vehículo de hidrógeno se

⁷ Se podría decir que una célula de combustible es una cuba de electrólisis funcionando al revés (con ciertas particularidades constructivas); es decir, combinamos dos átomos o moléculas en otra mayor y obtenemos a cambio una corriente eléctrica continua. En nuestro caso, juntamos oxígeno del aire e hidrógeno para dar agua, aunque se pueden combinar muchísimas otras cosas, incluidos hidrocarburos ligeros.

pone, siendo generosos, en un 45%, notablemente mejor que el de sus equivalentes térmicos (16-32%).

El problema es que las células de combustible usan una miríada de elementos caros o escasos. Son espejo de las cubas de electrólisis, así que las PEMFC⁸ (la más usada) y las SOFC⁹ (con problemas de respuesta lenta) requieren casi las mismas materias primas que las ya mencionadas cubas PEMEC y SOEC. Existe un tipo barato y exento de dicho problema: la célula alcalina, que ya se usaba en los años sesenta en la carrera espacial. Desgraciadamente, tiene un problemón: se envenena con CO₂, así que no puede funcionar con aire, habría que dotar los vehículos con depósitos de oxígeno o filtros infalibles.

No podemos olvidar las baterías. Mucho más pequeñas que las del coche enchufable, sí, pero imprescindibles. Las de litio necesitan también cobalto, manganeso y fósforo. Las de hidruro metálico, dependiendo del modelo, lantano, cerio, neodimio, praseodimio, cobalto, vanadio, circonio, cromo o manganeso.

Los requerimientos eléctricos de una sustitución completa del parque móvil son inabordables. En 2019 se dispensaron en España 5,4 Mt de gasolina y 23,4 Mt de gasóleo. El PCI contenido en todo ese combustible ronda los 350 TWh.¹⁰ Aplicando los rendimientos estándar de los vehículos de combustión, llegaron a sus ruedas unos 85 TWh. Considerando el rendimiento de los vehículos de hidrógeno, los boquereles de las hidrogeneras tendrían que suministrar 185 TWh para que llegase esa misma energía a las ruedas, para lo cual necesitamos 5,5 Mt¹¹ de H₂ y 50 hm³ de agua. Si ahora integramos los rendimientos de la electrólisis, las compresiones del hidrógeno y del transporte de la energía eléctrica, para electrolizar y comprimir esas 5,5 Mt necesitamos generar 330 TWh. La demanda eléctrica total española en 2019 fue de 264 TWh. Es decir, tendríamos que multiplicar por 2,25 la generación eléctrica y, de paso, cambiar la mayor parte de la red de distribución y transporte en alta tensión (transformadores incluidos), pues la actual eso no lo aguanta.

Resumiendo, el coche de hidrógeno es una falacia de composición que solo tiene sentido si no se generaliza o si se reduce dramáticamente el transporte (algo a todas luces incompatible con el capitalismo). Además, es para economías desahogadas, pues todo lo relacionado con esta tecnología es caro.

⁸ Proton Exchange Membrane Fuel Cell: «célula de combustible de membrana de intercambio de protones».

⁹ Solid Oxyde Fuel Cell: «célula de combustible de óxido sólido».

¹⁰ Teravatios hora. Un teravatio hora son 100 millones de kilovatios hora.

¹¹ Megatoneladas, es decir, millones de toneladas.



El tren de hidrógeno

Probablemente, este es el uso más absurdo propuesto para nuestro ligero protagonista. Recordemos: un vehículo de H_2 es un vehículo eléctrico. Comparemos los flujos energéticos de un tren eléctrico convencional y un tren de hidrógeno:

- **Tren eléctrico convencional:** Generación y transporte de electricidad → Transformación y rectificación → Catenaria → Motor eléctrico → Ruedas.
- **Tren de hidrógeno:** Generación y transporte de electricidad → Transformación y rectificación → Celda de electrólisis (nuevo) → Compresiones y transporte de H_2 (nuevo) → Depósito de H_2 (nuevo) → Célula de combustible (nuevo) → Motor eléctrico → Ruedas.



62

O sea, alguien propone mover nuestros trenes eléctricos introduciendo de por medio dos transformaciones electroquímicas innecesarias cuyo rendimiento combinado no llega al 50%, sin contar las nada desdeñables pérdidas de presurización y transporte del hidrógeno. Lo único que nos ahorramos es la catenaria. Siempre saldrá muchísimo más eficiente y barato electrificar la línea y requerirá bastante menos mantenimiento. Un estudio de ADIF de 2019 estimó que el coste de electrificar el 35% pendiente de la red ferroviaria española sería de unos 2.810 millones de euros. Una cifra modesta comparada con muchas otras inversiones menos necesarias y muy poco impresionante si, por ejemplo, la distribuimos en un plan a diez años.

Conclusión

La sociedad del hidrógeno nunca llegará, porque termodinámicamente es un despropósito y todo lo que está relacionado con esta tecnología es caro de implementar y mantener.

1. Rendimientos globales pobres o malos.
2. Inversiones siempre millonarias.
3. Costes de mantenimiento altos o muy altos (no es sostenible a gran escala).
4. Uso extensivo de elementos amenazados de escasez.
5. Transporte y almacenamiento complicados y gravosos.

El punto 2, que en una economía sensata debería ser un detrimento, es probablemente el punto fuerte del hidrógeno en nuestro demencial sistema económico. Todo hace sospechar que el interés por esta tecnología se puede

deber a las inversiones necesarias en sí mismas, las subvenciones comprometidas para su desarrollo y otros motivos espurios.

Sin embargo, las instalaciones construidas pasarían pronto a engrosar la larga lista de inversiones fallidas, inútiles o infrautilizadas, tan frecuentes en España. El efecto más pernicioso de una inversión innecesaria se refleja en lo que no está: lo que se podría haber hecho de provecho en vez de lo que se hizo con los recursos malgastados. Tirar a la basura tiempo y recursos con el hidrógeno desviará a una vía muerta infinidad de materias primas, energía y horas de trabajo que mejor empleamos de otro modo y que no se van a poder recuperar. ★

