
El reto de una economía plenamente descarbonizada

Antonio de Juan Fernández

El reto de la descarbonización de la economía, como sabemos y mayoritariamente aceptamos, es mayúsculo. Todos nuestros consumos energéticos e industriales (electricidad, transporte y calor), así como nuestra actividad agrícola y ganadera y los cambios de uso del terreno, emiten gases de efecto invernadero (GEI). Según la fuente consultada, éstos alcanzaron en 2019 valores en el entorno de las 36 Gt/año de usos energéticos e industriales y 6 Gt/año de cambios de uso del suelo como la deforestación; se estima que las emisiones totales de CO₂ y otros gases de efecto invernadero ascendieron a 55 Gt de CO₂ equivalente en 2018. El ritmo de crecimiento ha sido superior a 1 por ciento/año en el último decenio. Se estima actualmente una concentración de CO₂ en la atmósfera superior a 400 ppm, la cual ha causado ya 1 °C de incremento de la temperatura terrestre respecto a niveles pre-industriales, a razón de 0,2 °C/década al ritmo actual.

Introducción al «net zero»

Diversos estudios tratan de relacionar las emisiones de GEI futuras con el incremento de temperatura esperable y sus posibles –pero inciertos– impactos. Escenarios tendenciales arrojan un incremento de 3 a 5 °C para el año 2100, mientras que los expertos apuntan a cambios catastróficos e irreversibles para aumentos superiores a 1,5-2 °C. El objetivo de limitar el incremento a 1,5 °C –frente a 2 °C– ha cobrado fuerza recientemente, por las diferencias materiales entre ambos escenarios en cuanto al aumento del nivel del mar, la supervivencia de especies, las migraciones de zonas costeras o por falta de agua, y posibilidades de cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible y erradicación de pobreza. Así pues, numerosos escenarios de futura evolución de las emisiones de GEI siguen bajo estudio para lograr limitar el aumento de la temperatura media de la Tierra a 1,5 °C al final del siglo. Se estima que ya en el año 2030 sería necesaria una reducción de 45 por ciento respecto a 2010, alcanzando el mencionado «net zero» para el año 2050. Una menor ambición de alcanzar –25 por ciento en 2030 y «net zero» en 2070 llevaría a una senda de 2 °C. Y no reducir considerablemente las emisiones antes de 2030 anula las posibilidades del escenario de 2 °C, incluso ante un uso considerable de tecnologías de Retiro de Dióxido de Carbono (CDR).

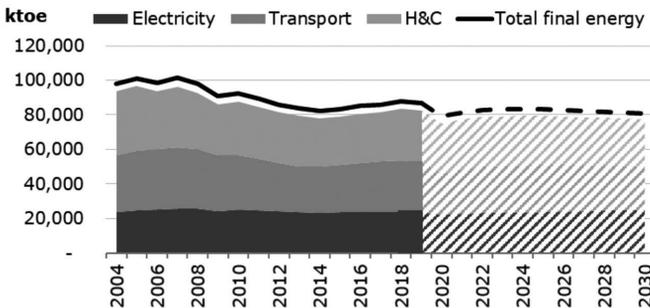
Alcanzar un objetivo de «net zero emissions», en que las pocas emisiones inevitables sean compensadas por los sumideros de carbono disponibles, pasa por cambios relevantes en la manera de desplazarnos por tierra, mar y aire, en las tecnologías de producción de electricidad como gran vector de descarbonización, y en nuestros hábitos alimenticios. Posiblemente también en el control de la natalidad, puesto que la población mundial se ha duplicado en los últimos cincuenta años y mantiene un crecimiento exponencial. Las grandes preguntas que aborda este artículo son: ¿Puede

la tecnología por sí sola permitirnos alcanzar el reto? ¿Qué papel jugarán la sociedad y la regulación?

Consumo energético

La siguiente figura muestra a título ilustrativo la evolución del consumo de energía final en España, desglosado según la metodología y datos de Eurostat. En orden de magnitud, nuestro consumo se reparte de manera equilibrada entre electricidad, transporte y calor&frío. El transporte abarca principalmente los productos petrolíferos para desplazamientos por tierra, mar y aire, así como escasos combustibles alternativos. El calor&frío incluye principalmente consumo de gas para la industria, biomasa y bombas de calor eléctricas. La electricidad se considera directamente energía final para todos los usos posibles, si bien hasta el año 2019 su participación en el transporte y el calor&frío es minoritaria por la baja penetración del vehículo eléctrico y la bomba de calor industrial.

Consumo histórico y proyectado de energía final en España



Fuente: EUROSTAT y AFRY.

En cuanto a la penetración de energías renovables –por tanto no emisoras–, España se sitúa hoy cerca del 20 por ciento sobre la energía final y más del 45 por ciento sobre la electricidad. Adicionalmente, otro 20 por ciento de la producción de electricidad es nuclear, no emisora de GEI.

Descarbonizar estos tres sectores al ritmo descrito anteriormente requiere de cambios tecnológicos relevantes, que permitan suprimir el omnipresente uso de hidrocarburos en todos ellos. Lógicamente, cada país afrontará retos diferentes acordes a su estructura de consumo energético y a las particularidades geográficas, económicas y sociales.

Electrificación del transporte y calor&frío

La electrificación de usos energéticos no electrificados a día de hoy es una de las principales vías de reducción de emisiones. Lógicamente, siempre y cuando la producción de la electricidad consumida sea no emisora de GEI, lo cual hoy por hoy limita las opciones a las energías renovables y la energía nuclear de fisión (ambas con ligeras pero no nulas emisiones en su ciclo de vida integral). La electrificación del transporte no sólo permite descarbonizarlo, sino que la eficiencia del motor eléctrico es hasta cuatro veces superior a la del motor de gasolina en su conversión del poder calorífico de la gasolina a energía mecánica. O dicho de otra manera, la energía primaria en ktep equivalentes que consume un país si electrifica el cien por cien de su transporte a gasolina es ¡hasta cuatro veces inferior!

Existen retos tanto en la propia electrificación de consumos no electrificados, como en el desarrollo de tecnologías de generación eléctrica no emisoras de GEI.

Es posible electrificar una gran parte del transporte, no sólo principalmente mediante el uso de coches eléctricos y transporte

colectivo, sino también marginalmente con fuertes apuestas por la movilidad en bicicletas y otros pequeños medios electrificados. Los principales retos se hallan hoy en los tiempos de recarga de las baterías para no reducir su vida útil, en el peso de las mismas para lograr autonomías superiores a los 400 km, la disponibilidad de puntos de recarga privados y públicos, la previsibilidad de disponibilidad futura de materiales necesarios –cobre, aluminio, níquel, litio, manganeso, cobalto. Pese a la predominancia del litio en las baterías, por su mejor compromiso entre densidad, peso, precio y durabilidad, existe abundante investigación sobre las baterías del futuro. Entre otros muchos frentes y metales bajo estudio, cabe destacar la investigación en baterías de estado sólido que, de solucionarse relevantes retos técnicos, auguran mejoras sustanciales en peso, autonomía, tiempos de recarga y duración. Apuntan determinados investigadores que dichas baterías podrían incluso permitir la electrificación del transporte pesado –camiones y autobuses–, para los que hoy en día se apuesta más bien por su descarbonización mediante hidrógeno y pilas de combustible.

En cuanto al transporte aéreo, hoy exclusivamente movido por querosenos y marginal contribución de biocombustibles, se plantea más bien la opción de utilizar en el futuro hidrógeno como combustible quemado directamente en turbinas de hidrógeno –que no existen hoy– por el excesivo peso de baterías y motores eléctricos. No obstante existen también proyectos de aviones eléctricos con pila de combustible e hidrógeno para cortas distancias y pocos pasajeros.

El transporte marítimo sí que podría parcialmente ser movido por motores eléctricos para distancias cortas, aunque el peso y la autonomía de las baterías no parecen augurar que el transporte marítimo de larga distancia pueda ser eléctrico a baterías nunca. Se abordan más adelante algunos retos de la electrificación del

transporte. También la competencia que supondrán las alternativas que utilizan hidrógeno.

La electrificación del calor&frío pasa principalmente por el uso de electricidad en procesos productivos que requieren alta temperatura, así como para calentar espacios.

Diversas tecnologías están ya disponibles para ambos usos, como son las bombas de calor, calentadores eléctricos resistivos, hornos resistivos, calentadores infrarrojos, hornos de inducción, hornos de arco eléctrico, o microondas y radio. Varias de ellas podrán competir con el hidrógeno como combustible, con *a priori* peor rendimiento y peor caso económico para éste último siempre que exista tecnológicamente la alternativa eléctrica directa. Países como Francia, con electricidad barata, han sido tradicionalmente calentados a nivel doméstico con electricidad resistiva, y numerosos países cuentan ya con políticas de incentivo al uso de bombas de calor, hasta cinco veces más eficientes. Y es que al igual que sucede al consumo de energía primaria en el transporte al remplazar motores de combustión por motores eléctricos, el remplazo de calderas de gas o de calentadores resistivos por bombas de calor reduce el consumo de energía primaria ¡hasta por cinco veces!

Cabe destacar que otra de las ventajas de la electrificación del calor&frío es la posibilidad de interactuar directamente con el sistema eléctrico, activando calderas para agua o las propias bombas de calor, en momentos de alta disponibilidad de energía solar o eólica, con beneficios para la integración de energías renovables así como ventajas económicas considerables.

Uso de hidrógeno en transporte, calor&frío e industria

El hidrógeno se presenta como una gran alternativa con altísimo potencial para sustituir a los combustibles fósiles líquidos y gaseosos

por su relativa facilidad de transporte y su versatilidad. Puede utilizarse tanto para calentar, como para su uso en medios de transporte, como por sus propiedades químicas para procesos productivos de refinerías, fertilizantes o acero. El hidrógeno podría:

- En forma gaseosa ser quemado en turbinas similares a las que hoy queman gas natural (si bien dicha tecnología no existe a día de hoy) para producir electricidad o impulsar aviones.

- Ser quemado en calentadores de agua u otro fluido portador de calor.

- Ser inyectado directamente en motores, ya posible hoy en día, pero no sin problemas técnicos aún por resolver.

- Ser utilizado en pilas de combustible para transformarse en energía mecánica mediante motores eléctricos.

- Ser transportado en forma líquida y con mayor densidad energética en «portadores de hidrógeno» como el amoniaco.

- Ser transportado en forma gaseosa utilizando infraestructuras existentes como las redes de gas natural, tanto mezclado parcialmente con el propio gas natural como en uso exclusivo sin mezcla.

Como es sabido, la combustión del hidrógeno no genera GEI sino vapor de agua, de la misma manera que su utilización en pilas de combustible para generar electricidad.

Hoy en día existe un relevante consumo de hidrógeno en refinerías y en producción de fertilizantes y amoniaco, así como en cohetes como combustible. No obstante, a pesar de ser el elemento más abundante en el universo y estar presente en la molécula de agua (H_2O) y en la mayoría de compuestos orgánicos, el hidrógeno en su forma útil se encuentra a nuestra disposición en la naturaleza en pequeñísima cantidad. Es decir que a diferencia de los hidrocarburos que obtenemos directamente de la naturaleza, el

hidrógeno como combustible lo debemos fabricar. De hecho, el hidrógeno utilizado hoy en día en los mencionados procesos industriales (principalmente amoníaco y refinerías, y próximamente producción de acero) no se capta del aire sino que se produce principalmente por reformado de metano (Steam Methane Reforming, o SMR); es decir extrayéndolo de la molécula CH_4 del metano predominantemente presente en el conocido «gas natural», produciendo también CO_2 como residuo de la reacción. Dicha manera de producir hidrógeno es conocida como «hidrógeno gris», y es hoy en día la técnica más barata disponible para producir grandes cantidades.

También se puede producir hidrógeno por electrólisis del agua, utilizando agua muy abundante en la tierra y electricidad como aporte energético para su transformación. En función de la manera de producir dicha electricidad, se dan nombres de colores al hidrógeno obtenido, como el verde (energías renovables), el azul (SMR con captura y almacenamiento del CO_2), el turquesa (similar al azul, dando uso industrial o comercial al CO_2 producido) o el rosa (energía nuclear de fisión). La cantidad de hidrógeno en la atmósfera, potencialmente recuperable por destilación de los gases del aire, es desafortunadamente despreciable por no decir prácticamente nula.

Además de reflexionar sobre las distintas maneras de producir hidrógeno útil, con sus respectivos retos tecnológicos, regulatorios y económicos, es preciso comprender las tecnologías para su uso y conversión a energía final, así como las maneras de transportarlo, todo lo cual es parte crítica del uso del hidrógeno como vector energético de descarbonización.

En cuanto al transporte y almacenamiento, es posible transportarlo en su forma «directa» (H_2), en estado líquido o gaseoso, con muy diferente logística en cada caso. Líquido, ocupa menor volumen y presenta por tanto mayor densidad energética por volumen,

no obstante precisa ser presurizado y enfriado hasta $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, almacenado con tecnología criogénica, y se deben evitar fugas con materiales diferentes y más costosos que los sencillos contenedores de gasolinas líquidas. Por otra parte, el hidrógeno es tan ligero que incluso en estado líquido, la densidad energética por unidad de volumen es casi cuatro veces inferior a la de las gasolinas, por lo que el volumen de los tanques –que no su peso– es un elemento crítico en el diseño de una economía del hidrógeno. Por ejemplo, un vehículo de pila de hidrógeno, que ya existen con disponibilidad comercial hoy en día, podría recorrer 100 kilómetros con apenas 1 kg de hidrógeno, en un tanque que ocuparía 14 litros de hidrógeno líquido (el estándar hoy es en estado gaseoso, con mayor volumen); frente a digamos 6 litros de gasolina, con un peso de 4 kg. Aviones propulsados por hidrógeno almacenado en estado líquido precisarían por tanto de casi 4 veces mayor volumen reservado al combustible para recorrer distancias similares.

Por estas problemáticas anteriores, así como por el coste de una infraestructura de licuefacción y mantenimiento de hidrógeno líquido, se contempla como más común y más probable el transporte en estado gaseoso, típicamente a una presión de 350 bares o hasta 700 bares como estándar de la industria de automoción. En forma gaseosa, el hidrógeno puede utilizar tuberías existentes para gas natural y materiales sencillos, con determinadas adaptaciones para evitar escapes de una molécula tan pequeña y fugaz. Puede transportarse de manera aislada en tuberías dedicadas, o bien mezclarse con gas natural con determinados límites técnicos hoy por hoy en el entorno de 20 por ciento en volumen, pero 6 por ciento en cantidad energética por unidad de masa. Su almacenamiento en forma gaseosa a nivel nacional también es parte crítica de toda la logística de distribución para disponer de un suministro continuo, habida cuenta de que la disponibilidad de energías renovables para producción «verde» es por su naturaleza intermitente. En

este sentido, se plantean las posibilidades de almacenamiento subterráneo en antiguas cavernas salinas –España resulta tener alta disponibilidad de emplazamientos subterráneos potenciales– o bien construir depósitos en superficie con un coste diez veces superior. Nótese que el almacenamiento subterráneo precisa por contra de toda una red de transporte de hidrógeno gaseoso entre el punto de producción, el almacenamiento, y el punto de consumo. Todas estas opciones están hoy abiertas y bajo estudio, y serán tanto la tecnología, sus costes, y los desarrollos normativos nacionales y supranacionales, quienes determinarán las soluciones tecnológicas más eficientes.

Así pues, el hidrógeno competirá en diversos usos con la electricidad, y será con toda probabilidad un agente de descarbonización. Hoy por hoy prevemos un desarrollo inminente del hidrógeno verde para sustituir el actual hidrógeno gris en plantas de fertilizantes y refinerías; posteriormente y gradualmente se adoptarán crecientes cantidades para producción de acero y para determinados usos de transporte pesado, y en el más largo plazo si hemos logrado abaratarlo suficientemente es posible que se extienda su uso a determinados transportes adicionales y determinados usos caloríficos. Todas estas elecciones naturalmente influenciadas por la geopolítica, la disponibilidad y coste de los distintos materiales necesarios para la electrificación directa o la logística del hidrógeno.

Portadores de hidrógeno

Como ya he explicado el hidrógeno presenta unas características físicas y químicas incómodas desde varios puntos de vista. La molécula es extremadamente pequeña y fugaz, tiene una bajísima temperatura de licuefacción no muy lejana al cero absoluto, incluso líquido tiene una bajísima densidad volumétrica de energía...

De forma que el transporte y almacenamiento del hidrógeno líquido son complicados y costosos, tanto en energía aportada a la licuefacción, como en mantenimiento del hidrógeno a temperatura criogénica. Así, se sigue trabajando en diversas maneras alternativas de transportarlo, «acoplado» a otras moléculas y «camuflando» en otros compuestos su forma H_2 .

Por una parte, es posible producir amoníaco (NH_3) a partir del hidrógeno, el cual destaca como el más prometedor a varios niveles. Su ausencia de carbono que evita la indeseada emisión de CO_2 en su re-transformación a energía final, su estabilidad como líquido a temperatura ambiente y baja presión, su extensa red de distribución ya existente, e incluso su mayor densidad energética que el hidrógeno puro, le auguran un probable ganador como combustible de barcos, e incluso se están empezando a desarrollar turbinas que quemen directamente el amoníaco sin necesidad de reconvertirlo previamente a hidrógeno con pérdidas de rendimiento en el proceso.

Hasta ahora no se ha hablado en este artículo del hidrógeno como vector de almacenamiento eléctrico, reutilizándolo ya sea en pilas de combustible, ya sea en turbinas para producción de electricidad. Si bien esto será técnicamente factible —una vez estén desarrolladas las hoy inexistentes turbinas de hidrógeno o turbinas de amoníaco, quizás hacia el final de esta década—, es importante entender las pérdidas de rendimiento en cada conversión:

- De electricidad (renovable) a hidrógeno en el electrolizador, próximo a 50 por ciento.
- De hidrógeno a electricidad, próximo también a 50 por ciento, tanto en una turbina en ciclo combinado, como en una pila de combustible.

Es decir, que el almacenamiento de electricidad en forma de hidrógeno para volver al sistema eléctrico presenta unas pérdidas

mínimas próximas al 75 por ciento, frente al 10 por ciento de baterías químicas o el 20 por ciento de bombes hidráulicos –cada cual con otras problemáticas asociadas. Más bien parece que la producción de hidrógeno será inicialmente utilizada para:

- Descarbonizar los procesos productivos que precisan de las propiedades químicas del hidrógeno, y que hoy utilizan hidrógeno gris emisor de CO₂.
- Descarbonizar el transporte pesado que no pueda electrificarse con baterías.
- Descarbonizar procesos industriales que requieran calor a temperaturas no alcanzables con tecnologías eléctricas o una continuidad de suministro que las renovables no pueden garantizar.
- Otros usos.

Notas sobre la dimensión social de una economía descarbonizada

Si bien queda claro que la tecnología será clave en avanzar hacia una economía descarbonizada, también parece claro que la tecnología no puede ni debe suplir la contribución de los aspectos más sociales con elevado impacto y *a priori* bajo coste. Entre ellos pueden mencionarse numerosos aspectos como la reducción o control de la natalidad, la adopción de distintos hábitos alimenticios (crece rápidamente la población vegetariana y vegana en Europa, que se estima alcanza el 3 por ciento), el mayor uso de transporte público y la bicicleta, el menor nivel de viajes largos de trabajo y de ocio sustituidos por economías más locales y menos globalizadas, el desarrollo de una economía más basada en servicios poco energéticos, etc.

Diversos estudios y voces reclaman ya incluso la necesidad de un decrecimiento económico, ya sea voluntario y organizado, ya

sea forzoso por escasez futura de combustibles que mueven nuestra economía con una elevadísima correlación histórica. Probablemente estas voces suenen en el futuro cada vez más. O quizás la tecnología y las adaptaciones sociales nos permitan descorrelar el crecimiento económico del crecimiento energético, de tal forma que se vislumbre una senda hacia una economía circular descarbonizada que calle dichas voces.

Conclusiones

La descarbonización de la economía se acepta ya globalmente y mayoritariamente como un requisito vital para nuestra propia supervivencia, habida cuenta de que los expertos la modelizan como imprescindible para evitar las irreversibles consecuencias desastrosas para el planeta de un aumento medio superior a 1,5 a 2 °C en este siglo. Y lo que es más, esta descarbonización debe producirse en torno a la mitad del siglo, por los efectos que tendrán los gases de efecto invernadero ya emitidos hasta hoy y los que seguiremos emitiendo durante la «transición», con tiempos de miles de años hasta su absorción por la naturaleza. Todo lo cual implica la necesaria acción hoy, encaminada a reducir sustancialmente las emisiones de GEI mucho antes del año 2030, bajo riesgo de perder toda posibilidad de alcanzar la senda de los escenarios de 1,5 a 2 °C, incluso confiando en elevados retiros futuros de GEI de la atmósfera.

La tecnología, en su amplia definición, es clave. En cabeza de los cambios necesarios y esperados, la electrificación del transporte y del calor & frío, que no sólo permiten reducir enormemente el consumo de energía primaria sino que permiten utilizar como fuente primaria energías renovables de muy bajas emisiones en su ciclo de vida y maximizar su aprovechamiento. El vehículo

eléctrico a baterías, y el uso de bombas de calor, serán tecnologías de crecimiento exponencial en las próximas décadas. En varias regiones se proyecta la eliminación absoluta de coches contaminantes en 2050 o antes. Por su parte, el hidrógeno se usará previsiblemente en pilas de combustible para transporte pesado por carretera, en turbinas de avión, y en barcos posiblemente transportado en forma de amoniaco; además de para procesos industriales como las refinerías, la producción de fertilizantes y de acero.

Si lograremos entrar en la senda de los escenarios de 1,5 a 2 °C en el horizonte 2030 hacia un 2050 descarbonizado, parece ambicioso pero es todavía incierto –al menos para el autor. Que los cambios tecnológicos –conocidos y por conocer– serán una parte clave de la transición energética parece incuestionable. Que la tecnología por sí sólo no podrá hacerlo todo, y deberá ser complementada con cambios sociales relevantes, también parece incuestionable.

Que hay que maximizar todos los esfuerzos por descarbonizar la economía desde hoy, con todas las herramientas a nuestro alcance, no hay la más mínima duda.

A. J. F.