

Oportunidades clave para la
descarbonización
del transporte
aéreo de larga
distancia

Tabla de contenidos

01.	Introducción	03
02.	¿En qué punto nos encontramos ahora?	05
03.	¿A dónde podríamos llegar?	07
04.	La elección del H₂ como combustible de aviación	11
	4.1 Hidrógeno azul frente a hidrógeno verde	15
	4.2 Pila de combustible frente a combustión	17
	4.3 Qué más necesitamos para avanzar en esta dirección	22
05.	Conclusiones	28

01

Introducción

Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la aviación están formadas sobre todo por el CO₂ que se produce en la combustión y que se libera durante el vuelo. La red de vuelos existente, densa pero distribuida a escala global, y su alta frecuencia hacen inviable cualquier medida directa para impedir o capturar las emisiones de CO₂. Sin embargo, existen opciones viables para conseguir vuelos libres de carbono, utilizando nuevos combustibles o nuevos métodos de propulsión que no dependan de él, como por ejemplo el hidrógeno, los combustibles nucleares, la energía procedente de baterías o el uso de combustibles que contengan carbono, pero cuyo origen sea sostenible, algo que sucede únicamente si para su producción se utilizan plantas (biomasa) como materia prima y biocombustible.

Aunque estas propuestas tienen ventajas y desventajas específicas, todas requieren hacer pruebas a gran escala, así como un rápido despliegue. Las decisiones sobre políticas e inversión que se tomen en los próximos años serán las que determinen el escenario y la viabilidad del objetivo global de descarbonizar a fondo la aviación. Este artículo presenta una serie de ideas tecnológicas que se están estudiando en la actualidad y que, una vez desarrolladas, podrían descarbonizar la aviación. También aborda los principales obstáculos y los posibles habilitadores tecnológicos que pueden contribuir a desbloquear el futuro de una aviación libre de carbono en los próximos 4-8 años.

La **primera parte** del documento describe la **situación actual**, la magnitud del problema y las tendencias de las emisiones de CO₂ vinculadas a la aviación, y resume brevemente los posibles pasos hacia una aviación respetuosa con el medioambiente. **La segunda parte** presenta una visión general de las **opciones libres de carbono** que podrían impulsar la aviación en el futuro y destaca las vías para desarrollar esas opciones a la escala necesaria. **La tercera parte** hace hincapié en la necesidad de desarrollar **soluciones adicionales** fundamentales para implementar una aviación remodelada y sin emisiones de carbono. **La última parte** resume las **principales oportunidades** que presentan las soluciones para la descarbonización del transporte aéreo a larga distancia que se han analizado.

Una de las principales conclusiones del artículo es que **se necesita una cartera de inversiones sistémicas, especialmente en lo relacionado con la producción y el almacenamiento de hidrógeno verde a gran escala**. Esto requiere la implementación y la garantía —posiblemente mediante una certificación— de un suministro de electricidad totalmente libre de carbono. **El hidrógeno verde es el elemento clave para descarbonizar la aviación**, porque el H₂ es imprescindible en todos los escenarios sin carbono estudiados.



02 ¿En qué punto nos encontramos ahora?

Hasta la llegada de la pandemia de COVID-19, **las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la aviación** iban en aumento, y en 2019 sumaron en total mil millones de toneladas de dióxido de carbono (1 GtCO₂, el **2,8% de las emisiones globales**)¹. El cierre de las fronteras internacionales poco después del inicio de la pandemia provocó la paralización del tráfico aéreo y, en consecuencia, en 2020 las emisiones de CO₂ se desplomaron hasta 0,6 GtCO₂. Ahora la tendencia se está revirtiendo. En 2021 las emisiones superaron claramente las 0,7 GtCO₂ y es posible que ya en 2024 alcancen el nivel previo a la pandemia². Sin embargo, esta tendencia de recuperación en los vuelos nacionales es más lenta que en los internacionales, lo que puede indicar un cambio más profundo en las preferencias de transporte. La percepción de que **la aviación tiene una posición excepcionalmente privilegiada en el caso de los viajes de larga distancia** supone una interesante oportunidad de cambio³.

La pandemia y la crisis climática han revitalizado la búsqueda global de nuevas soluciones que impliquen el esfuerzo conjunto de la industria, los Gobiernos y la comunidad académica como, por ejemplo, Clean Aviation⁴ o Aviation Impact Accelerator⁵.

1. IEA. Aviation – Analysis. 2022. <https://www.iea.org/reports/aviation> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

2. Kua, I. y Tan, F. "Shell Sees 2024 Aviation Fuel Demand Recovering to Pre-Pandemic Levels". Reuters. 27 de septiembre de 2022. <https://www.reuters.com/business/energy/shell-sees-2024-global-demand-aviation-fuel-return-level-before-pandemic-2022-09-27/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

3. Shuckburgh, E., Zenghelis, D., Agarwala, M., Anadon, L. D., Howard-Grenville, J., Peñasco, C., Seega, N., Whittington, E., Barford, A., Brayne, C., Siringhaus, H., Friend, S. R., Fitzgerald, S., Cebon, D., Ainalis, D., Barlow, C. Y., Mackie, E., Schooling, J., Guthrie, P., Ramage, M., Braeckman, J. P., Reiner, D., Eppele, C., Reynolds, D. F., Coomes, D., Griffiths, H., Segger, M.-C. C., Phillips, F.-K., Rands, M., Neilson, A. y Hayes, J. "A Blueprint for a Green Future – Multidisciplinary Report on a Green Recovery from COVID-19 by the Cambridge Zero Policy Forum". 2020. <https://doi.org/10.33774/coe-2020-2831j>.

4. Unión Europea. "Clean Aviation Joint Undertaking". https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/institutions-and-bodies-profiles/clean-aviation-joint-undertaking_en (consultado el 28 de noviembre de 2022).

5. AIA. "Target True Zero: Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen Powered Flight". Foro Económico Mundial. 2022. <https://www.aiazero.org/resources/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

La conclusión general extraída de estas actuaciones es que es necesaria una cartera de soluciones que se centre simultáneamente en medidas fácilmente accesibles, que permitan reducir las actuales emisiones relacionadas con la aviación, y en habilitadores tecnológicos que puedan definir el camino hacia una aviación libre de carbono. Sin embargo, las decisiones políticas y de inversión que se adopten en el futuro inmediato deben garantizar que el uso de estas nuevas soluciones en la aviación sea seguro, y que supongan un ahorro de CO₂ verificable y escalable.

Tabla. 1

Rutas estratégicas hacia una aviación sostenible y libre de carbono

Metas sencillas dirigidas a lograr una aviación comprometida con el medioambiente (con posibilidad de implementación inmediata):	Habilitadores tecnológicos para conseguir una aviación libre de carbono:	Soluciones que sientan las bases para los combustibles de aviación basados en H ₂ y SAFs bioderivados:
<ul style="list-style-type: none"> • Eliminar rutas nacionales de corta distancia para las que existen soluciones que generan menos carbono o en las que el transporte terrestre puede electrificarse • Volar a altitudes que minimicen la formación de estelas de condensación (<i>contrails</i>) • Implantar un código de prácticas durante las operaciones de vuelo y en tierra (por ejemplo, el rodaje) para minimizar siempre las emisiones de CO₂ • Operar únicamente vuelos a plena capacidad, por ejemplo, combinando el transporte de mercancías con el de pasajeros 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtener biomasa para biocombustibles, que sea respetuosa con el medioambiente, a gran escala. • Almacenamiento seguro y rentable del hidrógeno (H₂) a gran escala, incluido el H₂ licuado • Nuevos tipos de baterías ligeras y duraderas (además de las de litio) • Investigación medioambiental sobre nuevas tecnologías (como el análisis del ciclo de vida y la investigación sobre los óxidos de nitrógeno o la formación de estelas de condensación de H₂O en determinadas altitudes) 	<ul style="list-style-type: none"> • Biorrefinerías para producir combustibles de aviación sostenibles (SAFs) • Captura y almacenamiento de carbono para producir H₂ libre de carbono • Electricidad renovable (eólica, solar, etc.) para producir H₂ libre de carbono • Producción y distribución de H₂ licuado libre de carbono que dependa simultáneamente de H₂ libre de carbono y electricidad renovable.

Tabla 1. Fuente: elaboración por la propia autora.

03 ¿A dónde podríamos llegar?

La aviación tiene unos requisitos energéticos específicos comparado con otros sectores. En este sector, los requerimientos de potencia son elevados, al estar directamente relacionados con la distancia que recorren los vuelos y, al mismo tiempo, condicionados por la limitada disponibilidad de espacio y la masa máxima que puede transportar el avión. Son muy pocos los combustibles de transporte que pueden hacer frente a estos requisitos, lo que explica por qué el debate actual sobre una aviación libre de carbono suele reducirse a **dos opciones**:

- Utilizar un combustible lo más similar posible al combustible para aviones actual, pero **garantizando que se produce a partir de recursos sostenibles** y no provoca una acumulación adicional de CO₂ en la atmósfera (estos combustibles pueden producirse a partir de materias primas como la biomasa, lo que da lugar a combustibles de aviación sostenibles o SAFs, por sus siglas en inglés).
- **Introducir nuevos combustibles libres de carbono**, principalmente el hidrógeno comprimido o licuado.

Los SAFs permiten reducir la cantidad de CO₂ procedente de la aviación sin dejar de utilizar la flota mundial existente. Sin embargo, hoy en día no se sintetizan a la escala necesaria, y el desajuste es enorme: **la producción actual de SAFs (5,4 megatonnes, Mt, en 2020)⁶ es inferior al 2% de la demanda mundial de combustible para aviones (~250-330 Mt ahora y antes de la pandemia)⁷**. La obligación de aumentar la capacidad de producción actual de SAFs requiere ampliar (1) la disponibilidad y las cadenas de suministro de las materias primas de biomasa y (2) las infraestructuras

6. McKinsey&Co. Clean Skies for Tomorrow Workstream 1: SAF Feasibility and Sustainability. Foro Económico Mundial. 2020.

7. Naciones Unidas. "Production, Trade and Supply of Jet Fuels: Thousand Metric Tons and Kilograms per Capita". En Energy Statistics Yearbook 2019. 2022. pp. 249-266. <https://doi.org/10.18356/9789210012850c031>.

para producirlos. Hasta cierto punto, se puede solventar este último problema con las refinerías existentes. Sin embargo, el acceso a una cantidad de materia prima de biomasa que sea adecuada y suficiente para generar los gigatonnes de combustibles de aviación sostenibles necesarios sigue sin estar resuelto, y, por lo tanto, supone un obstáculo tecnológico a la ampliación de la producción de SAFs.

Por el contrario, la producción de H₂ es esencial en la industria química y su escala es similar a la de las refinerías de petróleo y la producción de combustible para aviones: en 2021 fue de 112 Mt⁸. Aunque **la capacidad actual de producción de H₂ ya ha alcanzado su límite**, la ampliación o multiplicación de las plantas de hidrógeno puede ser una solución más realista, porque ya existe la infraestructura necesaria y porque se puede acceder en abundancia a las materias primas que se utilizan en las plantas de H₂ existentes (gas natural o carbón, véase la figura 1). Sin embargo, aunque el *know-how* y la experiencia técnica para producir hidrógeno están consolidados, **utilizar H₂ como combustible de aviación exigiría un desarrollo intensivo de nuevas infraestructuras para su suministro y almacenamiento, así como el rediseño de la flota aérea**; es decir, aviones propulsados por hidrógeno. En este sentido, la posición de los SAFs parece ventajosa, ya que no habría que cambiar los sistemas de distribución ni los aviones, pero, una vez más, **la necesidad de aumentar la producción de SAFs en tres órdenes de magnitud** hace que su suministro a tiempo no esté asegurado.

La contraposición de estas opciones, los SAFs frente al H₂, divide a los expertos, y distintos organismos promueven diferentes^{9,10}. En este contexto, y para evitar retrasos en unas decisiones de inversión que se necesitan con urgencia, lo más sensato sería **seguir ambos caminos, los SAFs y el hidrógeno, para conseguir vuelos que generen cero emisiones de carbono**. Otro argumento para adoptar esta vía es que la producción eficiente de SAFs suele requerir como materia prima hidrógeno, que se utiliza para la hidrogenación o el hidrotratamiento de bioaceites. Así pues, garantizar la disponibilidad de hidrógeno libre de carbono es el primer paso para ambas opciones de combustibles. Además, **el desarrollo de una cartera de soluciones ayudaría a garantizar la resiliencia de la aviación futura**.

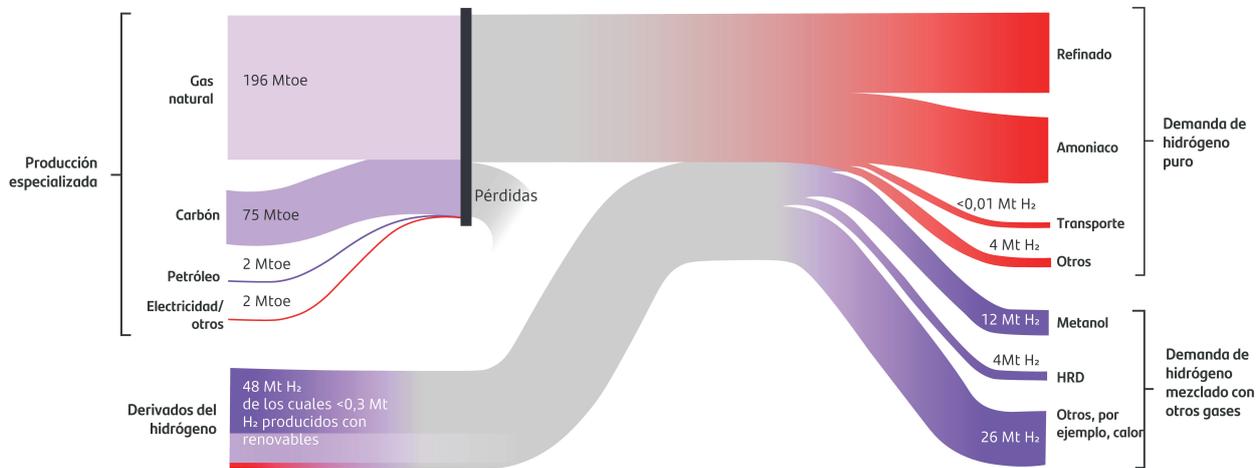
8. IEA. Global Hydrogen Review 2021. 2021. p. 223.

9. McKinsey&Co. Clean Skies for Tomorrow Workstream 1: SAF Feasibility and Sustainability. Foro Económico Mundial. 2020.

10. AIA. "Target True Zero: Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen Powered Flight". Foro Económico Mundial. 2022. <https://www.aiazero.org/resources/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

Figura 1

Orígenes y destinos del hidrógeno actualmente



Nota: Mtoe, siglas en inglés de millones de toneladas métricas de equivalente de petróleo. Mt, millón de toneladas.



Figura 1. Fuente: IEA

In focus

Importancia e incertidumbre a la hora de evaluar el futuro de los SAFs

Al ser combustibles *drop-in*, los SAFs son fáciles de introducir en la flota aérea existente, trasladando el esfuerzo necesario para desarrollar la infraestructura del sector de la aviación a la industria química. Las ventajas de reutilizar las mismas rutas de transporte y los mismos estándares de aplicación hacen que los SAFs sean atractivos, pero la falta de materias primas necesarias para su producción genera incertidumbre a la hora de prever su desarrollo. Así, el porcentaje de los SAFs en la reducción de emisiones prevista para una aviación de emisiones neutras varía entre una cifra pequeña y el 30-40% (atendiendo a estimaciones de Deloitte, McKinsey o CAPA).

En general, los supuestos en los que se basan los modelos de previsión privados no son accesibles, lo que dificulta hacer evaluaciones combinadas. Es comprensible que crezca el interés por los SAFs, sobre todo porque pueden ser considerados como una solución transitoria que preceda a los aviones propulsados por H₂. La materialización de esta solución dependerá principalmente de la disponibilidad de materias primas de biomasa muy oleicas (por ejemplo, vegetales, plantas oleicas, algas).

También se estudia una propuesta alternativa para los SAFs, en la que el carbono se obtiene a partir de CO₂ y luego se somete a un hidrotreatmento de varios pasos para producir hidrocarburos de cadena larga. Esta solución sigue requiriendo mucha energía y su comercialización aún queda lejos. Cabe destacar que **para garantizar que los SAFs a partir de CO₂ son sostenibles, el CO₂, el H₂ y la energía implicados en su producción deben proceder de fuentes renovables y no de combustibles fósiles**. El acceso a CO₂, H₂ y energía de origen sostenible es limitado, lo que resta prioridad al desarrollo de esta solución y cuestiona la viabilidad de la rápida implementación de la ruta CO₂-SAF.

04 La elección del H₂ como combustible de aviación

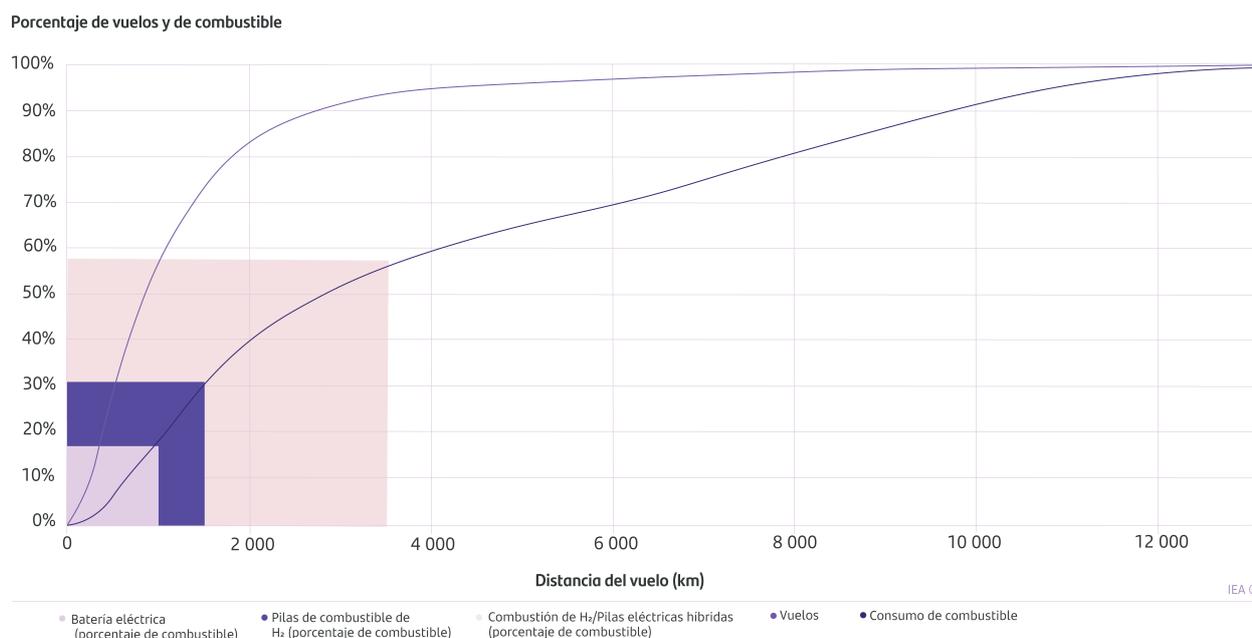
Conseguir que el sector de la aviación dependa, a escala mundial, del H₂, al mismo tiempo que se introduce una nueva flota aérea, es un reto considerable. Sin embargo, puede abordarse mediante una estrategia de “divide y vencerás”, implantando primero los vuelos propulsados por H₂ en los vuelos de largo recorrido.

Las emisiones generadas por la aviación comercial no se distribuyen por igual; **más del 60% de las emisiones proceden de los vuelos de corta y media distancia (hasta ~4.500 km)**, que suponen más del 90% de todos los vuelos (figura 2). Centrarse, en primer lugar, en la descarbonización de los vuelos de larga distancia permitirá afrontar una gran parte del desafío (el 40% de las emisiones) cubriendo solo una fracción de la red mundial de aviación. Abordar primero la aviación de larga distancia significa que será necesario desarrollar nuevas infraestructuras terrestres en lugares específicos donde ya operan este tipo de vuelos (por ejemplo, Londres, Madrid, Hong Kong y Sydney, entre otros). Además, habrá que introducir rápidamente un número relativamente pequeño de grandes aviones propulsados por H₂, dejando para más adelante la implantación en aviones más pequeños.



Figura. 2

Porcentaje de los vuelos y del consumo de combustible en la aviación comercial de pasajeros, y opciones tecnológicas con combustibles alternativos por distancia¹¹



Es probable que el cambio a este nuevo combustible encarezca los vuelos para los pasajeros. Desde un punto de vista social, esto es un motivo más para centrarse primero en los vuelos de larga distancia rediseñados para H₂. Según recientes estimaciones, solo entre el 2% y el 4% de la población mundial realiza vuelos internacionales, y alrededor del 50% del CO₂ procedente de la aviación comercial está relacionado con vuelos frecuentes que realiza el 1% de la población mundial¹². Estos pasajeros pueden permitirse el coste más elevado de los vuelos de larga distancia y tal vez sean menos sensibles al cambio de precios cuando se introduzcan nuevas tecnologías basadas en el H₂¹³. También se han propuesto políticas fiscales

11. IEA. Aviation – Analysis. 2022. <https://www.iea.org/reports/aviation> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

12. Gössling, S. y Humpe, A. "The Global Scale, Distribution and Growth of Aviation: Implications for Climate Change". Global Environmental Change 65. 2020. 102194. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>

13. Zheng, X. S. Aviation Climate Finance Using a Global Frequent Flying Levy. ICCT. Washington. 2022.

que abogan por establecer impuestos progresivos, sobre todo para los pasajeros frecuentes más ricos, como una posible vía de financiación que permitiría generar ingresos para descarbonizar la¹⁴. Este impuesto, asociado al número de viajes aéreos, reduciría la conveniencia de los vuelos de corta distancia, lo que supondría un incentivo adicional al uso de medios de transporte alternativos como el tren, el barco y el transporte por carretera. Sin embargo, es muy probable que estas decisiones que implican una sustitución no sean bien recibidas por los operadores aéreos locales, cuyo modelo de negocio se basa en tarifas baratas y una densa red de conexiones en distancias cortas.

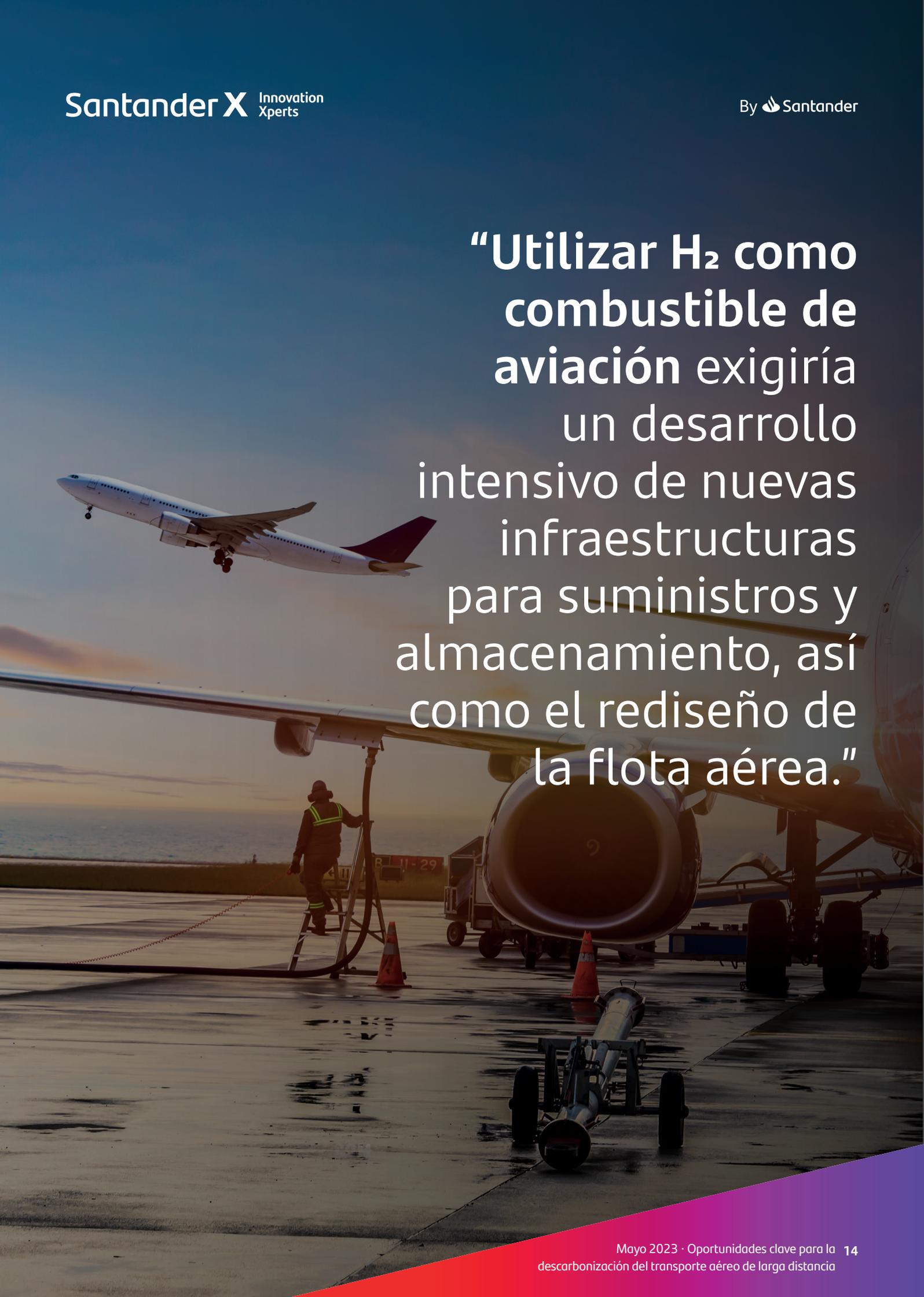
Aunque gran parte de esto se reduce a decisiones políticas, los inversores y el sector de la aviación podrían dar el primer paso de manera independiente si consideran que la opción de los vuelos de larga distancia propulsados por H₂ es la medida más razonable para empezar a reducir el impacto medioambiental de la aviación a gran escala. De hecho, ya se están desarrollando nuevos aviones propulsados por hidrógeno, tanto comprimido como licuado¹⁵. Hoy en día, los escenarios optimistas predicen que los vuelos comerciales propulsados por H₂ estarán listos para operar en los próximos doce o trece años¹⁶. Este tiempo parece razonable, si se tienen en cuenta los retos técnicos, las consideraciones de seguridad y de percepción pública (distorsionada, por ejemplo, por los problemas que han tenido los dirigibles de hidrógeno)¹⁷. El resto de este artículo analiza otros retos que deberían tenerse en cuenta para apoyar el desarrollo de una aviación libre de carbono y propulsada por H₂.

14. Zheng, X. S. Aviation Climate Finance Using a Global Frequent Flying Levy. ICCT. Washington. 2022.

15. Hampel, C. "Hydrogen Fuel Cell Aircraft – What for and When?". electrive.com. 26 de agosto de 2022. <https://www.electrive.com/2022/08/26/hydrogen-fuel-cell-aircraft-what-for-and-when/> (consultado el 29 de noviembre de 2022).

16. AIA. "Target True Zero: Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen Powered Flight". Foro Económico Mundial. 2022. <https://www.aiazero.org/resources/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

17. "Hindenburg Disaster". Wikipedia. 2022.



“Utilizar H₂ como combustible de aviación exigiría un desarrollo intensivo de nuevas infraestructuras para suministros y almacenamiento, así como el rediseño de la flota aérea.”

4.1 Hidrógeno azul frente a hidrógeno verde

Utilizar hidrógeno como combustible libre de carbono no basta para afirmar sus ventajas medioambientales, porque estas dependen en gran medida de cómo se produzca. El hidrógeno que se produce actualmente se denomina "H₂ gris", porque depende de combustibles fósiles y lleva asociadas emisiones de CO₂ (véase la figura 3). Las rutas alternativas de producción de H₂ dan lugar a hidrógeno "azul" y "verde", como se explica más adelante, pero en este momento ninguna de ellas puede competir en escala con la ruta gris.

Para poder considerar medioambientalmente sostenible la producción de H₂ a partir de combustibles fósiles el proceso no debe derivar en emisiones de CO₂, sino en **la captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés)**. Aunque todavía no están vinculadas a la producción de H₂, las tecnologías CCS llevan utilizándose más de cincuenta años¹⁸. Por lo tanto, deben considerarse comercialmente maduras, aunque estén insuficientemente conectadas e implantadas en la industria química actual. Por lo tanto, cualquier nueva capacidad de H₂ destinada a la aviación que se produzca a partir de carbón o gas natural debería estar inherentemente asociada a la CCS para apoyar la introducción del "H₂ azul". De hecho, ambas tecnologías podrían verse pronto como una inversión conjunta, generando nuevas oportunidades.

Una manera más sencilla de obtener hidrógeno libre de carbono sería mediante la electrólisis del agua. Siempre que la producción de electricidad se acompañe de CCS, esta ruta produciría de nuevo H₂ azul. Pero si la electricidad se produce de forma totalmente sostenible, es decir, utilizando energía renovable procedente del viento o la luz solar, entonces su utilización en la electrólisis generaría un hidrógeno sostenible y "verde". En la actualidad, el suministro de H₂ procedente de electrólisis es muy pequeño en comparación con el que proviene de los combustibles fósiles, y representa ~2% de la producción total de hidrógeno. Los electrolizadores a escala industrial son relativamente escasos porque ampliar la escala de la electrólisis resulta menos rentable que escalar los procesos químicos basados en reactores, es decir, el H₂ procedente de combustibles fósiles. Esto se debe a la naturaleza de los procesos electroquímicos, en los que el parámetro clave es la disponibilidad de superficie,

18. Loria, P. y Bright, M. B. H. "Lessons Captured from 50 Years of CCS Projects". The Electricity Journal 34(7). 2021. 106998. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106998>.

mientras que en los reactores los procesos se escalan con volumen. En consecuencia, incluso con electrolizadores de nueva generación, el desarrollo de la nueva capacidad de producción de H₂ podría requerir un mayor número de unidades para igualar los volúmenes de producción de H₂ que pueden obtenerse en instalaciones químicas con combustibles fósiles.

Figura. 3

Los colores del hidrógeno y sus emisiones de CO₂ asociadas¹⁹

	Hidrógeno Gris	Hidrógeno Azul	Hidrógeno Verde
Proceso	Reformado o gasificación	Reformado o gasificación con captura de carbono	Electrolisis
Fuente de energía	Combustibles fósiles 	Combustibles fósiles 	Electricidad renovable 
Emisiones estimadas del proceso de producción ^a	Reformado: 9 - 11 ^b Gasificación: 18 - 20	0,4 - 4,5 ^c	0

Nota: a) CO₂eq/kg = dióxido de carbono equivalente por kilogramo; b) para el hidrógeno gris, se consideran 2 kg CO₂eq/kg por las pérdidas de metano durante el proceso de reformado del metano con vapor; c) las emisiones del hidrógeno azul tienen en cuenta un rango de tasa de captura de carbono de entre el 98% y 68% y entre el 0,2% y el 1,5% de pérdidas de metano.

El hidrógeno azul ha sido criticado recientemente por no estar del todo libre de carbono y mantener nuestra dependencia de los combustibles fósiles. La raíz del primer argumento surge de la creencia habitual de que la captura de carbono a gran escala no es 100% eficiente, y se suele citar un objetivo para la tasa de captura de CO₂ del 90%. En realidad, tecnológicamente, son factibles tasas muy superiores, pero se argumentaba que el coste aumentaría de manera exponencial con estas exigencias de captura: es mucho más fácil capturar el primer 90% de CO₂ que el resto. Sin embargo, hace poco se ha cuestionado esta suposición del 90% y, de hecho, se ha

19. IRENA. Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. 2022. p. 118.

descubierto que no es óptima. Una eliminación de CO₂ mucho mayor, de hasta el 98%, es técnicamente factible y económicamente razonable²⁰. Con una tasa de captura de CO₂ del 98%, la producción de H₂ azul será la ruta incipiente más rápida para conseguir combustibles libres de carbono.

El segundo argumento es indudablemente cierto, pero el metano del gas natural contiene la mayor ratio hidrógeno/carbono y supone la menor producción de CO₂ por unidad de energía utilizable, en comparación con otros combustibles fósiles. Sin embargo, la situación geopolítica actual hace que la dependencia del petróleo y del gas natural sea difícil de justificar, lo que cuestiona las inversiones en H₂ azul. En este contexto, el rápido desarrollo de la industria del *fracking* (por ejemplo, en Estados Unidos) puede verse como una oportunidad para lograr que el gas se distribuya a escala global, reduciendo la dependencia del petróleo crudo²¹. Ese acceso a un gas distribuido globalmente podría respaldar un lanzamiento más rápido del H₂ para la aviación, al beneficiarse de cadenas de suministro más resilientes.

4.2 Pila de combustible frente a combustión

El combustible de hidrógeno para aviación puede utilizarse de dos maneras: en pilas de combustible electroquímicas y mediante combustión. En ambos procedimientos, el hidrógeno reacciona con el oxígeno para formar agua, $H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$, pero en el método electroquímico, la reacción implica la división del H₂ en $H^+ + 2e^-$ con un catalizador, tras lo cual los dos electrones se retiran a través de un circuito externo, lo que constituye la generación de electricidad.

Por el contrario, la combustión del hidrógeno se produce sin catalizadores y genera gases de combustión a alta temperatura que contienen sobre todo H₂O, el producto de la combustión, pero también subproductos indeseables como óxidos de nitrógeno, NO_x. La utilización de pilas de combustible electroquímicas en la aviación conduce esencialmente a un vuelo eléctrico, mientras que la utilización de H₂ para la combustión, reproduce casi el mismo sistema de combustión que se utiliza

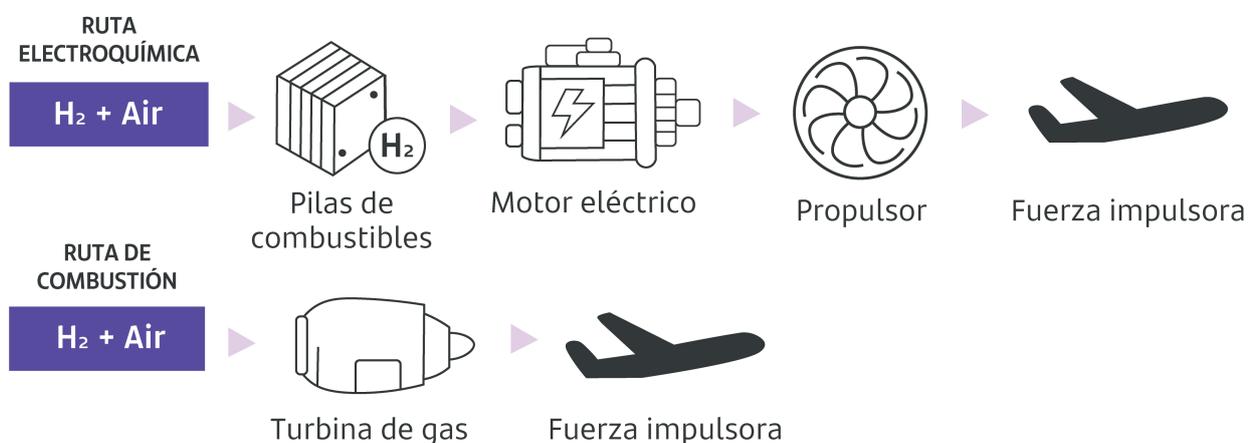
20. Brandl, P., Bui, M., Hallett, J. P. y Mac Dowell, N. "Beyond 90% Capture: Possible, but at What Cost?". *International Journal of Greenhouse Gas Control* 105. 2021. 103239. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103239>.

21. Cai, Y. y Wu, Y. "Understanding Gas Pricing Mechanisms: Implications for the Asian Market". *Australasian Journal of Environmental Management* 28(4). 2021. pp. 373-390. <https://doi.org/10.1080/14486563.2021.1979111>.

actualmente para quemar los combustibles de los aviones a base de queroseno. Tanto los vuelos propulsados por H₂ como los propulsados por combustible se consideran de emisiones cero, en referencia a la ausencia de emisiones de CO₂ durante el vuelo. La figura 4 presenta una comparación de ambas rutas aplicadas a la aviación.

Figura. 4

Propulsión de un avión por H₂ mediante la ruta electroquímica o la de combustión



En ambas rutas de utilización del hidrógeno será necesario rediseñar el fuselaje del avión para tener en cuenta los diferentes requisitos del almacenamiento del H₂, cuya densidad energética volumétrica es menor —tanto la del H₂ comprimido (1,1 kWh/L) como la del H₂ licuado (2,2 kWh/L)— que la del queroseno (~9 kWh/L)²². Por lo tanto, **se necesita más espacio para almacenar la misma cantidad de energía por viaje que en un avión convencional**. Construir una aeronave nueva y muy eficiente con suficiente capacidad de almacenamiento de H₂ para viajes de larga distancia requerirá un diseño y una configuración interna diferentes, así como materiales nuevos y duraderos. Por lo tanto, lo más probable es que **los aviones propulsados por H₂ tengan un aspecto diferente a los de la flota actual**²³. Otra posibilidad sería

22. AIA. "Target True Zero: Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen Powered Flight". Foro Económico Mundial. 2022. <https://www.aiazero.org/resources/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

23. Hampel, C. "Hydrogen Fuel Cell Aircraft – What for and When?". electrive.com. 26 de agosto de 2022. <https://www.electrive.com/2022/08/26/hydrogen-fuel-cell-aircraft-what-for-and-when/> (consultado el 29 de noviembre de 2022).

adaptar los actuales reduciendo la capacidad de carga y de pasajeros²⁴.

Además de utilizar hidrógeno y oxígeno, la otra característica que comparten ambas tecnologías es que están **técnicamente maduras y disponibles comercialmente**, pero ninguna se ha implementado en la aviación. Las pilas de combustible disponibles en el mercado se basan en una membrana de transferencia de protones hecha de un polímero llamado Nafion, y se suelen denominar pilas PEM (por las siglas en inglés de “membrana de intercambio de protones”). Las pilas de combustible PEM existen desde hace más de cincuenta años y su coste ha disminuido considerablemente a medida que lo hacían los costes de producción del Nafion²⁵. Pueden proporcionar las altas densidades energéticas que se necesitan en el transporte, pero, al igual que sucede con los electrolizadores, su escalabilidad es complicada. Las pilas de combustible PEM funcionan por debajo de 100°C, a temperaturas que permiten que su membrana se humedezca. Esa temperatura tan baja impone requisitos adicionales de refrigeración constante para los apilamientos de pilas de combustible (*stacks*). El pesado sistema de refrigeración limita el tamaño del stack que puede meterse a bordo de una aeronave. Aunque rara vez se discute, unos sistemas de refrigeración más ligeros (que utilicen, por ejemplo, la capacidad de refrigeración del aire a gran altitud) ayudarían a rediseñar las soluciones de pilas de combustible disponibles en el mercado para que fueran más compatibles con la aviación.

La combustión de hidrógeno en turbinas de gas tampoco es novedosa, pero hasta ahora todas las aplicaciones se han centrado en sistemas estacionarios. Tanto General Electric como Siemens, que son importantes fabricantes de turbinas, utilizan mezclas de gas con un alto contenido en H₂, de hasta el 60% vol, y su objetivo es que, en un futuro próximo, las turbinas de gas funcionen con un 100% vol de H₂^{26,27}.

24. Abu Kasim, A. F. B., Chan, M. S. C. y Marek, E. J. “Performance and Failure Analysis of a Retrofitted Cessna Aircraft with a Fuel Cell Power System Fuelled with Liquid Hydrogen”. *Journal of Power Sources* 521. 2022. 230987. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.230987>.

25. De Bruijn, A. F. y Janssen, G. J. M. “PEM Fuel Cell Materials: Costs, Performance and Durability”. En *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Meyers, R. A., ed. Springer. Nueva York. 2012. pp. 7694-7730. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_152.

26. GE Gas Power. “Hydrogen-Fueled Gas Turbines”. *gepower-v2*. <https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines> (consultado el 29 de noviembre de 2022).

27. Siemens Energy: Developing a completely hydrogen-fueled gas turbine. “Committed to H2”. <https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-b-b-agema> (consultado el 29 de noviembre de 2022).

Además, la utilización de turbinas de gas en la aviación requiere que existan planes previos para gestionar los subproductos no deseados de la combustión, los NOx. Los óxidos de nitrógeno son tóxicos, provocan lluvia ácida y se consideran gases de efecto invernadero de larga²⁸. En la actualidad, los NOx procedentes de la combustión del hidrógeno en las turbinas de gas parecen inevitables²⁹. Se están investigando métodos para reducir su creación durante la combustión, y algunos investigadores afirman que en un futuro próximo la cantidad de NOx derivados de las aplicaciones terrestres del H₂ podría ser similar a la de los sistemas de gas natural^{30,31}. Es necesario establecer pronto y de manera clara una estrategia en relación con las emisiones de óxidos de nitrógeno procedentes de la combustión alimentada con H₂, porque solo entonces podrá evaluarse adecuadamente la idoneidad de estas turbinas de gas para la aviación. Si bien la eliminación de todos los NOx es imposible, es necesario entender bien las consecuencias medioambientales del aumento de estas emisiones antes de iniciar el cambio a la combustión con H₂.

Otra incertidumbre relacionada con la combustión del hidrógeno para la aviación está en la **formación de estelas de condensación de H₂O (contrails)**. Las consecuencias de las estelas de condensación y sus mecanismos no son plenamente comprendidas, pero los expertos están de acuerdo en que pueden aumentar de manera significativa la contribución de la aviación al calentamiento global³². Las contrails se crean cuando las moléculas de agua se depositan sobre una pequeña partícula sólida (por ejemplo, hollín) y luego se congelan. De hecho, las estelas de condensación de los aviones

28. Miller, C. J., Prashanth, P., Allroggen, F., Grobler, C., Sabnis, J. S., Speth, R. L. y Barrett, S. R. H. "An Environmental Cost Basis for Regulating Aviation NOx Emissions". *Environmental Research Communications* 4(5). 2022. 055002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac6938>.

29. Therkelsen, P., Werts, T., McDonell, V. y Samuelsen, S. "Analysis of NOx Formation in a Hydrogen-Fueled Gas Turbine Engine". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 131(3). 2009. <https://doi.org/10.1115/1.3028232>.

30. Douglas, C., Emerson, B., Lieuwen, T., Martz, T., Steele, R. y Noble, B. NOx Emissions from Hydrogen-Methane Fuel Blends. Strategic Energy Institute. 2022. p. 4.

31. EERE. "H2IQ Hour: Addressing NOx Emissions from Gas Turbines Fueled with Hydrogen: Text Version". Energy.gov. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2iq-hour-addressing-nox-emissions-gas-turbines-fueled-hydrogen-text-version> (consultado el 29 de noviembre de 2022).

32. Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., Sausen, R. y Wilcox, L. J. "The Contribution of Global Aviation to Anthropogenic Climate Forcing for 2000 to 2018". *Atmospheric Environment* 244. 2021117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.

“Los inversores y la industria de la aviación pueden dar el primer paso, ya que los vuelos de larga distancia alimentados con H₂ parecen ser la vía más razonable de reducir a gran escala el impacto ambiental de la aviación.”



pueden considerarse nubes artificiales persistentes³³. Dado que el vapor de agua es el principal producto de combustión de los combustibles de H₂, se prevé que con el nuevo combustible aumente la creación de *contrails*, aunque aún no está confirmado. El riesgo de crear estelas de condensación procedentes de la combustión de H₂ es alto, pero todavía incierto. El hollín lo forman partículas de carbono sin quemar, que no se encuentra en los combustibles de hidrógeno. Es bastante dudoso que esta ausencia de hollín en la combustión del H₂ sea suficiente para impedir la formación de estelas de condensación, pero el efecto sigue sin estar determinado. Los ensayos de campo para evaluar las estelas de condensación procedentes de la combustión del H₂ están previstos para 2025³⁴. El agua también es un producto de la utilización de H₂ en las pilas de combustible, pero al funcionar por debajo de 100°C su licuefacción es manejable. De hecho, que el agua se vuelva líquida es deseable, porque debería reciclarse para mantener la pila de combustible con el nivel de humedad necesario³⁵.

La licuefacción del agua y su almacenamiento deberían ser las opciones de planificación por defecto a la hora de diseñar sistemas de pilas de combustible para aviones, al menos hasta que se entienda del todo el mecanismo de creación de las estelas de condensación.

4.3 Qué más necesitamos para avanzar en esta dirección

Como ya se ha señalado, el trabajo de diseñar nuevos aviones propulsados por H₂ debería ir acompañado de avances en la producción y la distribución del H₂. Ninguno de los métodos actuales de producción de H₂ puede considerarse 100% libre de carbono: cuando se produce H₂ a partir de combustibles fósiles no se utiliza la CCS (liberando en vez de capturar el CO₂) y falta electricidad libre de carbono (el mix eléctrico medio se basa en un ~40% en el carbón). Así, es necesario aumentar los esfuerzos para acelerar el lanzamiento de una serie de tecnologías que garanticen un suministro de H₂ libre de carbono. Además de desplegar soluciones que ya están consolidadas, se necesitan varios habilitadores tecnológicos (enumerados también en la tabla 1 de la página 6):

33. Seinfeld, J. H. "Clouds, Contrails and Climate". *Nature* 391(6670). 1998. pp. 837-838. <https://doi.org/10.1038/35974>.

34. AIA. "Target True Zero: Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen Powered Flight". Foro Económico Mundial. 2022. <https://www.aiazero.org/resources/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

35. Abu Kasim, A. F. B., Chan, M. S. C. y Marek, E. J. "Performance and Failure Analysis of a Retrofitted Cessna Aircraft with a Fuel Cell Power System Fuelled with Liquid Hydrogen". *Journal of Power Sources* 521. 2022. 230987. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.230987>.

36. AIA. "Target True Zero: Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen Powered Flight". Foro Económico Mundial. 2022. <https://www.aiazero.org/resources/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

37. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen-Powered Aviation: A Fact Based Study of Hydrogen Technology, Economics, and Climate Impact by 2050. Publications Office of the European Union. 2020.

38. Völkl, J. y Alefeld, G. "Diffusion of Hydrogen in Metals". En Topics in Applied Physics. Hydrogen in Metals I: Basic Properties, Alefeld, G. y Völkl, J., eds. Springer. Berlín y Heidelberg. 1978. pp. 321-348. https://doi.org/10.1007/3540087052_51.

Santander X Innovation Xperts

By  Santander

- **Un almacenamiento del H₂ ligero y eficiente:** La densidad energética volumétrica del H₂ es baja, pero su densidad energética gravimétrica es inigualable, si no se tiene en cuenta la masa de los tanques de almacenamiento. Uno de los primeros pasos que habría que adoptar para implantar el H₂ es el desarrollo de nuevos materiales que permitan un almacenamiento eficiente y ligero. El pronóstico actual es optimista: se preve una mejora potencial de la eficiencia gravimétrica para el almacenamiento del H₂ líquido, que pasaría del 15% actual al 60%³⁶. Si se alcanza pronto este nivel, podría readaptarse una parte de la flota aérea existente para poner en marcha operaciones de aviones propulsados por H₂ antes de que llegue la nueva flota aérea rediseñada. Una vez desarrollado, el almacenamiento ligero creará nuevas oportunidades en la aviación, ya que es probable que las aeronaves propulsadas por hidrógeno líquido sean bastante más ligeras que los aviones tradicionales equivalentes³⁷.
- **La distribución del hidrógeno:** Estar preparados para la aviación propulsada por H₂ implicará desarrollar métodos específicos de producción, distribución y repostaje. Estos pueden basarse en vías de suministro similares a las que se utilizan para los combustibles de jet, pero las soluciones técnicas para manipular y transportar el hidrógeno serán diferentes. Además, el almacenamiento de H₂ a largo plazo sigue siendo problemático, porque el H₂ puede penetrar a través de los metales³⁸. Resolver estos dos problemas a la vez puede resultar sinérgico, al igual que ocurre en otros métodos logísticos utilizados en las cadenas de suministro de mercancías.
- **La investigación medioambiental sobre nuevas tecnologías:** El impacto medioambiental que pueden tener las nuevas tecnologías descritas en este informe, y las que se propongan en el futuro, debe investigarse junto a otras actividades de I+D. Por ejemplo, los efectos y la aparición de estelas de condensación siguen sin entenderse del todo y con detalle; mientras que

36. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen-Powered Aviation: A Fact Based Study of Hydrogen Technology, Economics, and Climate Impact by 2050. Publications Office of the European Union. 2020.

37. AIA. "Target True Zero: Unlocking Sustainable Battery and Hydrogen Powered Flight". Foro Económico Mundial. 2022. <https://www.aiazero.org/resources/> (consultado el 28 de noviembre de 2022).

38. Völkl, J. y Alefeld, G. "Diffusion of Hydrogen in Metals". En Topics in Applied Physics. Hydrogen in Metals I: Basic Properties, Alefeld, G. y Völkl, J., eds. Springer. Berlín y Heidelberg. 1978. pp. 321-348. https://doi.org/10.1007/3540087052_51.

la creación de NOx en la combustión directa del H₂ dificulta su aplicación en sistemas de combustión simples. El análisis del ciclo de vida de las nuevas tecnologías permite compararlas con criterios fundamentados, teniendo en cuenta el impacto total en diferentes escenarios. Solo entonces, con una visión completa del posible impacto medioambiental, será posible seleccionar las opciones que de verdad sean más beneficiosas para el medioambiente. De igual manera, las tecnologías para la producción de H₂ deben, lo primero, estar libres de carbono, para resultar favorables para la aviación, sobre todo cuando el objetivo es alcanzar un estado de descarbonización total.



In focus

Consideraciones políticas

En todo el mundo se están debatiendo e introduciendo poco a poco nuevas estrategias para apoyar el paso a una aviación con cero emisiones netas.

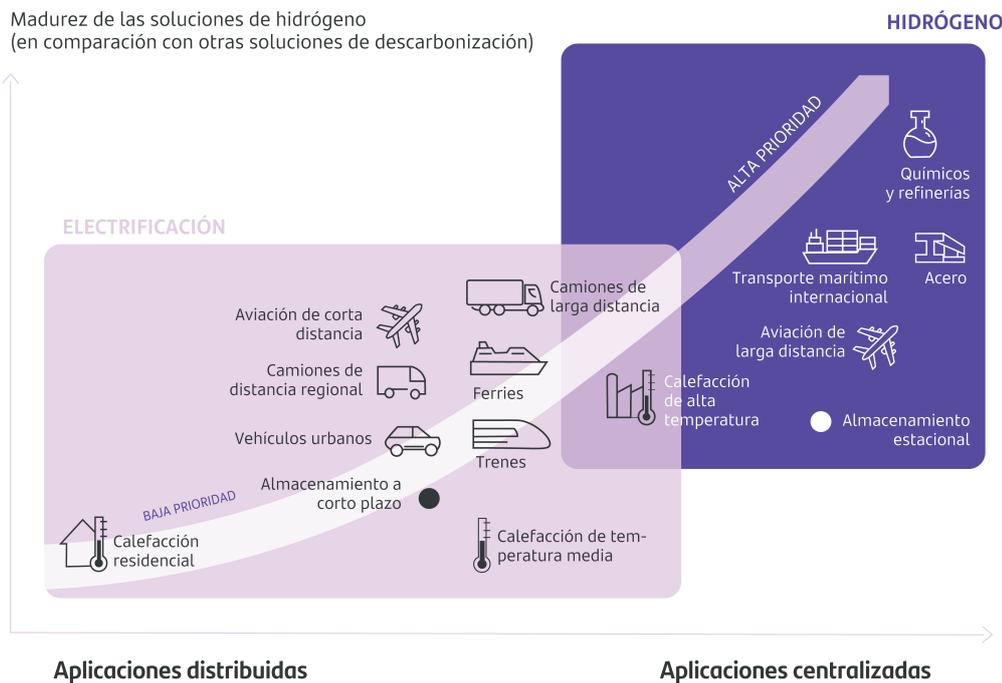
Estas pueden dividirse en:

- **Regulaciones y planes de acción que se centran en las estrategias para una aviación con cero emisiones netas:** Existe una herramienta online para el seguimiento de políticas, creada por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Algunos ejemplos de políticas y planes de desarrollo existentes son: el Canada's Aviation Climate Action Plan (que reduce las emisiones mediante H₂, SAFs, electrificación y compensación de carbono para la aviación), la Ley de Reducción de la Inflación en Estados Unidos (centrada en desgravaciones fiscales concretas para aumentar la capacidad de los SAFs), la Jet Zero Strategy de Reino Unido (que apoya el H₂ y los SAFs y está relacionada con la UK Hydrogen Strategy, que prevé además una prueba de repostaje de H₂ en el aeropuerto de Teesside), la Asociación Europea para una Aviación Limpia de la UE (H₂ y SAFs), el Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE) (impuestos a las emisiones de CO₂), el Objetivo 55 de la EU con la iniciativa ReFuelEU Aviation (SAFs), el Reglamento de la UE sobre infraestructuras de combustibles alternativos, el Desarrollo Verde de la Aviación Civil de China (sin soluciones concretas) o el programa Emerging Aviation Technology Partnership en Australia (todas las tecnologías incipientes).

- **Reglamentos para apoyar el desarrollo de la economía del hidrógeno, incluida la producción, la distribución y las aplicaciones del H₂.** Más de treinta países han elaborado o están preparando estrategias sobre el hidrógeno, y también se están desarrollando marcos internacionales de colaboración.³⁹ Según la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), el desarrollo futuro de las políticas debería centrarse en las soluciones de hidrógeno más maduras y centralizadas que se muestran en la figura 5.

Figura. 5

Prioridades del hidrógeno verde³⁹



39. IRENA. Green Hydrogen: A Guide to Policy Making. International Renewable Energy Agency. Abu Dabi. 2020.

In focus

Consideraciones sobre los costes

En la actualidad, la aviación depende de combustibles producidos a partir de materias primas petroquímicas baratas. El precio de los nuevos combustibles carbonados (SAFs) o no carbonados (H₂) dependerá de la capacidad de producción disponible y del coste de las materias primas y la electricidad, y se espera que sigan siendo bastante más altos que los de los combustibles para aviones fósiles. Entre los mecanismos que pueden apoyar la utilización de soluciones bajas en carbono están las medidas reguladoras, incluidas las medidas positivas que abordan directamente el origen de los combustibles, o reglamentos que se centran en las emisiones asociadas al combustible, por ejemplo, de CO₂, pero también los NOx⁴⁰.

Otra estrategia podría ser la introducción de un impuesto a la aviación, asociado a volar en general o a la cantidad de CO₂ emitida. Todas las medidas reguladoras dependerán de las políticas locales y el apoyo público. Por último, la adopción de nuevos combustibles se acelerará si el coste de los SAFs y el H₂ puede reducirse. Se espera que se produzca una reducción de los costes cuando aumente la escala de implementación. Sin embargo, no todas las tecnologías pueden escalarse con facilidad, por lo que la búsqueda de nuevas soluciones para la producción de SAFs y H₂ sigue activa. En vista de los tiempos asociados a la aviación libre de emisiones, la reducción de los costes debería abordarse enseguida, posiblemente con una combinación de diferentes medidas de apoyo.

40. Miller, C. J., Prashanth, P., Allroggen, F., Grobler, C., Sabnis, J. S., Speth, R. L. y Barrett, S. R. H. "An Environmental Cost Basis for Regulating Aviation NOx Emissions". Environmental Research Communications 4(5). 2022. 055002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac6938>.

05 Conclusiones

En 1961, el presidente John F. Kennedy presentó su proyecto de llevar astronautas a la luna al final de esa década. El Apolo 11, que realizó el primer aterrizaje a la luna ocho años después del inicio del programa Apolo, completó el reto con éxito⁴¹. Descarbonizar la aviación es un reto diferente, pero una oportunidad parecida de impulsar el cambio. **Necesitamos decisiones osadas y dedicación para reinventar el sector de la aviación, pero si los esfuerzos son globales aún es posible cumplir con los tiempos para conseguir una aviación libre de emisiones.** Los avances que se hayan hecho al final de la década determinarán la dirección que tomaremos para lograr una aviación libre de carbono.

Como se propone en este artículo, es necesaria una cartera de tecnologías para producir cantidades suficientes de hidrógeno verde, algo esencial para todas las soluciones de descarbonización que se debaten actualmente. Si se tiene en cuenta la escala que requiere la aviación, la centrada en el hidrógeno es la más factible.

Los próximos años serán cruciales para discutir la viabilidad de las propuestas existentes para la descarbonización del sector de la aviación. Además de nuevas tecnologías para conseguir una flota aérea libre de carbono, los avances en la descarbonización de la aviación deberán ir acompañados del desarrollo y la implementación de otras tecnologías de apoyo necesarias, como la construcción de una nueva capacidad de producción de hidrógeno, el aumento de la aportación de electricidad renovable, la introducción de CCS y la consecución de un almacenamiento ligero de H₂.

41. NASA. "What Was the Apollo Program?". <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-was-apollo-program-58.html> (consultado el 29 de noviembre de 2022).

Autora

Dra. Ewa Marek

Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Universidad de Cambridge

Profesora Adjunta en el Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología de la Universidad de Cambridge desde 2019, tras pasar cinco años como asociada posdoctoral en el Departamento de Ingeniería. Antes de llegar a Cambridge, Ewa trabajó durante seis años en I+D industrial y métodos de medición avanzados en Nottingham (Reino Unido), Petten (Países Bajos) y Varsovia (Polonia).

En la Universidad de Cambridge, Ewa participa activamente en múltiples proyectos sobre la producción sostenible de energía y productos químicos, colaborando con diversos departamentos y centros de investigación interdisciplinar, como el Aviation Impact Accelerator, Energy IRC, Cambridge Zero o el Centre for Climate Repair.

esade

Santander X Innovation
Xperts

<https://www.santander.com/es/landing-pages/santanderx-innovation-xperts>

By  Santander