

Principales retos del hidrógeno

“En las adversidades sale a la luz la virtud”
Aristófanes⁴⁶



A pesar de tener grandes beneficios y estar llamado a posicionarse como un vector energético esencial para la descarbonización, el desarrollo del hidrógeno verde se enfrenta a numerosos retos a lo largo de toda la cadena de suministro.

Producción de hidrógeno renovable

El primer eslabón de la cadena de suministro es la propia producción del hidrógeno verde, siendo uno de los principales retos a afrontar su elevado coste en comparación con las alternativas convencionales. Hoy en día, el coste nivelado del hidrógeno verde (LCOH⁴⁷ por sus siglas en inglés) presenta unos valores entre dos y tres veces superiores a los costes de producción de hidrógeno azul, el producido a partir de combustibles fósiles con captura de CO₂ (CCUS)⁴⁸.

Para comprender cómo se podría reducir esta diferencia de coste, es preciso indicar en primer lugar que típicamente entre el 66% y el 75% del LCOH corresponde con los costes de operación, principalmente el coste de la electricidad renovable necesaria, mientras que los costes de capital representan entre el 25% y 33%. Por tanto, la principal clave para disminuir el coste de producción del hidrógeno está en reducir los costes de operación. Estos dependen, fundamentalmente, de tres factores: el precio de la electricidad, la eficiencia de la instalación y el grado de carga, siendo el primero el mayor de ellos.

La reducción del precio de la electricidad y el grado de carga dependen en gran medida del marco regulatorio (peajes y cargos aplicables, criterios de adicionalidad / intensidad de emisiones / correlación temporal y geográfica que se fijen para considerar el hidrógeno y sus derivados como renovables, posibilidad de inyección en red gasista, etc.), mientras que incrementar el rendimiento de la instalación, y por tanto reducir la cantidad de electricidad necesaria para producir 1 kg de hidrógeno renovable, requiere mejoras en la tecnología de electrólisis y un diseño y operación más optimizado.

Con respecto a la contribución del CAPEX al LCOH, ésta podrá reducirse en la medida en que se produzcan caídas en los costes de producción favorecidos por un descenso de los costes unitarios gracias al desarrollo tecnológico, cambios en los materiales empleados, efecto de economías de escala y curva de aprendizaje, optimización de la capacidad de producción y la cadena de suministro.

Existe, por lo tanto, margen de reducción en los costes de la electrólisis, pero en el corto y medio plazo podrían darse fluctuaciones de precios causadas por desajustes en la cadena de suministro, debidas a un crecimiento de la demanda de electrolizadores más acuciante que el desarrollo de la capacidad de producción.

Más allá del coste de producir el hidrógeno, la producción de hidrógeno renovable a gran escala también se enfrenta a retos asociados a los principales insumos de la electrólisis: el agua y la electricidad renovable.

- ▶ Para producir 1kg de hidrógeno es necesario proporcionar entre 9-10 litros de agua destilada a los electrolizadores. Si además se tiene en cuenta el uso de agua para la refrigeración de la instalación y el agua de rechazo (el volumen de agua, rica en sales disueltas, que se obtiene como subproducto de la purificación del agua), el volumen necesario puede ascender a entre 20 y 27 litros por kg de hidrógeno.

Esto hace que los proyectos han de planificar debidamente la captación del agua a emplear. Pese a que el volumen del agua necesaria, comparado con otros usos actuales del agua, es muy reducido, este es un aspecto cada vez más sensible debido a los periodos de sequía y estrés hídrico

⁴⁶Aristófanes, dramaturgo de la antigua Grecia. Nacido alrededor del año 446 a.C., es considerado uno de los más grandes representantes del género cómico en la literatura clásica.

⁴⁷El LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) es una variable que indica cuánto cuesta en promedio producir 1 Kg de Hidrógeno considerando todos los costes, tanto de capital como de operación, involucrados en su producción a lo largo de la vida útil de la instalación.

⁴⁸IRENA. "Green Hydrogen Overview". (2021).

desgraciadamente cada vez más frecuentes como consecuencia del cambio climático. Por otro lado, los proyectos han de obtener también la autorización para verter el agua de rechazo mencionada anteriormente, que es fundamentalmente agua limpia con mayor concentración de sales resultado del proceso de osmosis.

- ▶ El otro gran reto de la producción de hidrógeno a gran escala probablemente sea el obtener toda la electricidad renovable necesaria. A modo indicativo, con las tecnologías actuales se necesitan entre 50-60kWh de electricidad para producir 1 kWh de hidrógeno. Si además se expande el uso del hidrógeno y sus derivados en nuevos sectores industriales y el transporte pesado, sería necesaria mucha electricidad. Esto implica instalar una gran potencia eólica y solar, a añadir a la necesaria para la electrificación directa de otros sectores como la movilidad ligera o la climatización, con los consiguientes desafíos de conexión a la red, uso del suelo, etc.

Infraestructura de transporte del hidrógeno

En la actualidad, el hidrógeno se transporta fundamentalmente por carretera, en camiones cargados con bombonas de hidrógeno a diferentes presiones, o bien por tubería. Es relevante destacar los retos relacionados con este último modo de transporte del hidrógeno, ya sea mediante la inyección en la red gasista existente (*blending*) como en una red dedicada exclusivamente al transporte de hidrógeno.

Las tuberías de gas natural existentes no pueden utilizarse directamente para el transporte del hidrógeno a grandes concentraciones debido a la fragilización del acero que este gas produce en contacto directo con el gasoducto. Como se ha visto previamente, el *blending* (o mezcla) de hidrógeno con el gas natural se considera una opción para dar salida al hidrógeno

desde las instalaciones de producción. No obstante, esto se plantea siempre en unas concentraciones muy reducidas que actualmente varían entre el 3% y el 5% en volumen⁴⁹; e incluso a estas concentraciones se puede ver afectada significativamente la vida útil de las tuberías.

Asimismo, debido al propio funcionamiento de la red gasista y la mecánica de fluidos, no es sencillo asegurar que no se superan las concentraciones volumétricas máximas admisibles en tramos de la red, pues la concentración real de hidrógeno en el gas que circula por una parte de la red depende de los flujos en cada momento, el número y ubicación de los puntos de inyección, etc. Además, los puntos de inyección han de diseñarse y ubicarse cuidadosamente para evitar concentraciones elevadas en torno a los mismos.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que a la misma red de gas se conectan diferentes tipos de usuarios y, una vez se inyecta el hidrógeno en la red, no es posible saber qué cantidad de este sale por cada punto de ella. Allí donde el gas se usa como combustible, concentraciones bajas de hidrógeno probablemente no tengan un efecto significativo, más allá de variaciones en el poder calorífico del gas (dado que el porcentaje de mezcla es volumétrico y la intensidad energética del hidrógeno en volumen es muy inferior al metano, por lo que cuanto mayor sea el porcentaje de mezcla menor será el poder calorífico por unidad de volumen del gas resultante). En cambio, aquellas industrias que empleen el metano como insumo, principalmente del sector petroquímico, sí pueden ver afectados sus procesos por la menor pureza del gas natural.

Una alternativa (o evolución) al *blending* es la creación de redes dedicadas exclusivamente a transportar hidrógeno. En este

⁴⁹Energy Sci Eng: Howarth RW, Jacobson MZ. "How green is blue hydrogen?". (2021).





sentido, el *repurposing*, o conversión de la red gasista existente para el transporte de hidrógeno, permite ahorrar costes y plazos (*permitting*, expropiación, etc.) significativamente. Sin embargo, la transición de uno a otro vector plantea nuevos retos: ¿cuándo se ha de parar el transporte de gas natural y empezar a adecuar la infraestructura al hidrógeno?

Una posibilidad es comenzar en tramos que cuentan con dos gasoductos en paralelo, transformando primeramente uno de ellos. La limitación es que esto probablemente solo sea posible en una parte pequeña de la red. Además, va a depender de que la producción y el consumo estén ubicados en los volúmenes adecuados justamente en estas zonas. Otra posibilidad sería no hacer *repurposing* de gasoductos existentes, sino construir hidroductos *greenfield* en paralelo a la red existente aprovechando los terrenos y derechos de paso disponibles. En este caso, uno de los principales problemas a solucionar es dónde construir las nuevas estaciones de compresión de hidrógeno, ya que hay una alta probabilidad de no contar con espacio suficiente.

En España, Enagás ha anunciado el inicio del proceso de *Call For Interest* no vinculante para los primeros componentes esenciales de la Red Troncal Española de Hidrógeno. Este proceso tiene como objetivo evaluar el nivel de interés por parte de los actores clave del sector energético en la creación de las infraestructuras necesarias para el transporte de hidrógeno renovable.

Utilización del hidrógeno

Otro factor clave para que el hidrógeno renovable sea una palanca efectiva en la descarbonización mundial, es que es necesario no solo producirlo, sino también transformar los usos finales y crear la demanda necesaria para justificar la inversión en su producción y distribución. Esto implica la necesidad de invertir en la infraestructura de suministro, las tecnologías de producción y almacenamiento, y crear las políticas adecuadas para fomentar y asegurar la adopción.

Como se ha ido comentando a lo largo del documento, en la actualidad, la mayoría de los usos finales del hidrógeno están enfocados en aplicaciones industriales, como la producción de amoníaco o metanol, u otros usos como refinación de petróleo. Sin embargo, es necesario que el hidrógeno renovable también se utilice en otros sectores, como el transporte y la generación de energía eléctrica.

- ▶ En el sector del transporte, el hidrógeno renovable puede utilizarse en vehículos de pila de combustible para proporcionar una alternativa de combustible limpia y sin emisiones. Sin embargo, para lograr una adopción masiva de estos vehículos, es necesario desarrollar una infraestructura de suministro de hidrógeno que cubra las necesidades de los usuarios en diferentes regiones. Esto implica una inversión significativa en la construcción de estaciones de hidrógeno y la adaptación de las actuales estaciones de combustible fósil.
- ▶ En cuanto a la generación de energía eléctrica, el hidrógeno renovable puede utilizarse para equilibrar la variabilidad de las fuentes renovables, como la energía eólica y solar. Sin embargo, para que esto sea viable, es necesario desarrollar tecnologías de producción y almacenamiento de hidrógeno a gran escala. Además, también se necesitan incentivos y regulaciones adecuadas para fomentar la inversión en proyectos de almacenamiento de hidrógeno.
- ▶ Otro factor importante en la transformación de los usos finales del hidrógeno es la necesidad de una transición justa y equitativa. La transformación de las industrias de fabricación de vehículos que dependen de combustibles fósiles para usar hidrógeno renovable puede tener un gran impacto en los trabajadores y comunidades que dependen de estas industrias. Por lo tanto, se necesitan políticas y programas para garantizar que los mismos tengan acceso a oportunidades de empleo y capacitación para nuevas habilidades en la economía del hidrógeno renovable.

Mercado de hidrógeno

El hidrógeno es en la actualidad un gas industrial producido generalmente en las mismas instalaciones donde se va a consumir. Por lo tanto, aun no existe un mercado maduro para el mismo. Esto implica que no existe un índice de precios de referencia establecido en el mercado, lo que se traduce en mayores costes pagados por los consumidores, ya que hay poca transparencia de precios y competencia. A esto se suma la poca demanda de hidrógeno bajo en carbono en la actualidad, haciendo que los proyectos deban integrarse desde la producción hasta la infraestructura y el uso final.

Sin embargo, a medida que se desarrolle el sector del hidrógeno, cabe esperar la creación de mercados. Aunque es posible establecer ciertos paralelismos entre el desarrollo de estos mercados y el que se produjo con el gas natural (basado en el GNL), existen algunas particularidades:

- ▶ Mientras que los combustibles fósiles se extraen de yacimientos geológicos ubicados en áreas geográficas muy concretas, el hidrógeno se puede producir en casi cualquier parte, siempre que haya agua y electricidad. Esto favorece la creación de oferta y diluye el poder de mercado de los productores.
- ▶ Los costes de transportar hidrógeno por barco (medido en cantidad de energía por kilómetro) son mucho más altos que en el caso del GNL debido a su menor densidad energética en volumen y a su muy bajo punto de ebullición. Adicionalmente, si se transporta en otra forma (metanol, amoníaco, LOHC, etc.) habría que sumar además las pérdidas de conversión correspondientes (especialmente relevantes si no se utiliza directamente en la misma forma que se transporta). Esto hace además que el coste de transporte del hidrógeno a presión por tubería sea mucho

menor que por barco y por lo tanto que el factor localización sea más relevante en la formación de precio que en el caso del GNL.

- ▶ Debido a esto, la competitividad en los mercados va a estar fuertemente marcada por el coste agregado tanto de producir como de transportar el hidrógeno hasta la demanda final o emplazamiento de referencia (no única o principalmente por el coste de producción).

Por último, es necesario remarcar que el producto no ha de ser el hidrógeno en sí, sino el hidrógeno verde/bajo en emisiones. Por lo tanto, es necesario que haya una definición y sistema de certificación relativamente homogéneo y creíble. Sin esto, no es posible saber si el hidrógeno generado cumple con criterios similares y no se está pagando hidrógeno sucio, o no tan limpio, a precio de verde.

Además, un reto importante para poder desplegar el mercado del hidrógeno es dar cobertura a los requerimientos para el acceso a financiación. En la Unión Europea, existen las subastas del Fondo de Innovación, donde se busca apoyar la producción de hidrógeno renovable no biológico en Europa. Estas subastas representan una iniciativa clave para acelerar la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, pero también requieren una estructura financiera sólida y una planificación cuidadosa para garantizar que los proyectos de hidrógeno puedan acceder a la financiación necesaria para su desarrollo y éxito a largo plazo. Además, el Plan Industrial del Pacto Verde anunció el lanzamiento de la primera subasta para la producción de hidrógeno renovable en otoño de 2023, con un presupuesto del Fondo de Innovación de 800 millones de euros destinados a ser pagados como prima fija a los productores de hidrógeno renovable. Cabe destacar también el EU Hydrogen Bank, una subasta europea que otorgará hasta 800 millones de euros a productores de hidrógeno renovable.



Por último, existen palancas que podrían permitir acelerar y fomentar la descarbonización de la industria introduciendo el hidrógeno en esos mercados. Un instrumento político que podría ayudar en este contexto, son los contratos de carbono por diferencia (CCfD), contratos a largo plazo para pagar la diferencia entre el precio actual del carbono y el coste real de la reducción del CO₂. En el ámbito de la UE, la Comisión tiene previsto poner en marcha los CCfD como parte de su plan REPowerEU para apoyar el cambio de la actual producción de hidrógeno en los procesos industriales del gas natural a las energías renovables.

Regulación

La regulación del hidrógeno verde es un aspecto clave, pues juega un papel fundamental en el desarrollo e implementación de este vector energético. Algunos de los principales retos presentes a nivel regulatorio, son los siguientes⁵⁰:

- ▶ Creación de marcos regulatorios específicos para el hidrógeno verde, evitando que sea tratado del mismo modo que otros gases comunes en la industria, como por ejemplo limitando su producción a zonas industriales.
- ▶ Definición de lo que se considera hidrógeno verde o renovable, donde se limiten las condiciones y máximas emisiones de gases de efecto invernadero permitidas en el proceso de producción, cuyo perímetro debe ser concretado.
- ▶ Desarrollo de los incentivos financieros y no financieros necesarios, para fomentar la inversión en instalaciones de producción de hidrógeno renovable.
- ▶ Creación de sistemas de garantías de origen para el hidrógeno renovable o de bajas emisiones, que faciliten la aparición de un mercado del hidrógeno.

⁵⁰HyLaw: "EU policy paper" (2019).

Resumen de actuaciones regulatorias por continente y país.

Ámbito	Europa		América del Norte		América del Sur		Asia + Oceanía	
	Unión Europea	Reino Unido	EE.UU.	Canadá	Colombia	Chile	China	Australia
Estrategia nacional del hidrógeno	EU Hydrogen Strategy REPowerEU	UK Hydrogen Strategy	National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap	Hydrogen strategy for Canada	Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	"Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)"	Australia's National Hydrogen Strategy
Objetivo de capacidad instalada en 2030	44 GW (Fit-for-55) 65 GW (REPowerEU)	10 GW	-	-	1-3 GW	5 GW	"Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)"	Australia's National Hydrogen Strategy
Objetivo de capacidad instalada en 2030	Fit-for-55 Renewable Energy Directive (2009/28/EC) 2 actos delegados	Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) Industrial Carbon Capture Business Model (ICC BM) UK Emissions Trading Scheme (ETS)	Bipartisan Infrastructure Law (BIL) Inflation Reduction Act (IRA)	Clean Hydrogen Investment Tax Credit	Decreto 1476 de 2022	Ley 21.305 de Eficiencia Energética	14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Outline of Long-Term Goals for 2035	Commonwealth Hydrogen Regulation Guarantee of Origin scheme
Apoyo a la inversión e innovación	NextGenerationEU IPCEI Hy2Tech IPCEI Hy2Use European Hydrogen Bank European Clean Hydrogen Alliance	Hydrogen Investment Roadmap Powering Up Britain: Net Zero Growth Plan	Clean Hydrogen Electrolysis Program	Net Zero Accelerator (NZA) Clean Fuels Fund	Ley 2099 de 2021	CORFO	National Key R&D Programs (NKPs)	Hydrogen Headstart Program
Regulación del hidrógeno en la red gasista	EU Directive on Gas and Hydrogen Networks CertifyHy	Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution	HyBlend	G-25—Policy on the use of gas meters in hydrogen-blending activities in the natural gas network	-	-	-	National Gas Law (NGL) National Energy Retail Law (NERL)
Normativa para adaptar el H₂ al transporte	'Sustainable and Smart Mobility Strategy' together with an Action Plan CertifyHy	Targeting net zero - next steps for the Renewable Transport Fuels Obligation: Hydrogen and renewable fuels of non biological origin	Alternative Fuel Excise Tax Credit Alternative Fuel Infrastructure Tax Credit Carbon Reduction Program (CRP)	Emissions Reduction Plan 2030	-	Ley 21.305 de Eficiencia Energética	-	Commonwealth regulation relevant to hydrogen mobility and transport

Detalle del marco regulatorio en distintas zonas geográficas

Unión Europea

- **Estrategia de hidrógeno publicada.** La estrategia de la UE sobre el uso del hidrógeno se adoptó en 2020 y está enfocada en hacer posible que la producción y el uso de hidrógeno renovable puedan ayudar a descarbonizar la economía de la UE de una manera rentable, en línea con el *Green Deal* europeo, y contribuir a la recuperación económica posterior a la crisis del COVID-19. Hoy en día ya se están cumpliendo las bases establecidas en esta estrategia, pues en el primer cuatrimestre de 2022 ya se habían cumplido los 20 primeros puntos de acción establecidos en Julio de 2020, momento en el que esta estrategia fue adoptada.

Adicionalmente, con la publicación del plan REPowerEU en el segundo cuatrimestre de 2022, la Comisión Europea completa la estrategia propuesta en 2020, a la vez que aumenta sus ambiciones sobre el hidrógeno renovable como importante vector energético para alejarse de las importaciones de combustibles fósiles de Rusia.

- **Marco legal y regulatorio.** En cuanto a regulación, la UE aprobó en 2021 el paquete *Fit for 55*, en el que se encuentran una serie de propuestas legislativas para promover la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero. Además, en febrero de 2023, la Comisión Europea ha dado un nuevo paso para definir el marco regulatorio del hidrógeno y su relación con otras normas ya existentes, al concretar en dos actos delegados la definición de hidrógeno renovable. En el primer acto se dan los requisitos para considerar como combustible renovable a aquellos basados en hidrógeno¹. En el segundo se define como se debe calcular la reducción de emisiones al utilizar este tipo de combustibles².

Además, en el REPowerEU se estableció el objetivo de producir 10 millones de toneladas de RFNBOs para 2030, lo cual supondría 500 TWh de electricidad renovable (un 14% del total de electricidad consumida en la EU)³.

- **Apoyo a la inversión e innovación.** En los últimos años la UE ha estado promoviendo distintas iniciativas para incentivar la inversión e innovación en el mercado del hidrógeno. El programa de recuperación tras la crisis de COVID-19, "NextGenerationEU" implicó grandes inversiones en proyectos de transición verde y digitalización. Posteriormente en 2020, se integró el hidrógeno en los Proyectos Importantes de Interés Común Europeo (IPCEI Hy2Tech e IPCEI Hy2Use). Por último, durante estos últimos meses se ha estado consolidando el "European Hydrogen Bank", una propuesta que busca crear una entidad financiera especializada en proyectos de hidrógeno en la Unión Europea. Su objetivo es movilizar inversiones privadas y públicas para acelerar el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y contribuir a la transición energética.
- **Regulación del hidrógeno en la red gasista.** En 2021, la Comisión Europea propuso reformar la Directiva de Gas de la UE de 2009 como parte del paquete propuesto de mercados de hidrógeno y gas descarbonizado. La reforma busca crear un marco legal para las redes de hidrógeno similar al existente para el gas y la electricidad, ampliando los derechos de los consumidores y regulando la integración de hidrógeno en las redes energéticas de la UE. Esta propuesta ha avanzado en el Parlamento y el Consejo de la UE durante 2022 y 2023 como parte de un proceso legislativo en curso.

Además, se están promoviendo iniciativas para constituir un sistema robusto de garantías de origen del hidrógeno renovable, un ejemplo de ello es CertifHy que proporcionó la base para el primer esquema de Garantía de Origen no gubernamental para el hidrógeno en el mundo.

- **Normativa para adaptar el hidrógeno al transporte.** El desarrollo del transporte de hidrógeno en Europa está secundado por la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la Comisión Europea publicada en 2021⁴, en la que se establecen una serie de hitos para lograr un transporte inteligente y sostenible en Europa. Entre estos hitos, se destaca

que para 2030 se espera que haya al menos 30 millones de vehículos de emisión cero en las carreteras europeas y que se duplique el tráfico ferroviario de alta velocidad. Además, se planea que los viajes colectivos programados para distancias cortas sean neutros en carbono y que el hidrógeno juegue un papel importante en el logro de estos objetivos, especialmente como fuente de energía limpia para vehículos de emisión cero y para aplicaciones marítimas.

Reino Unido

- **Estrategia de hidrógeno publicada.** En agosto de 2021, Reino Unido publicó su estrategia nacional sobre el hidrógeno, UK Hydrogen Strategy⁵. En el documento se describen los objetivos y la ruta a seguir para poder alcanzar el objetivo "Net Zero by 2050". Posteriormente, en agosto de 2023, el "Department of Business, Energy and Industrial Strategy" publicó una actualización de dicha estrategia, aumentando el objetivo de capacidad instalada para 2030 a 10 GW.
- **Marco legal y regulatorio.** La "Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS)" recoge los requisitos necesarios que definen el hidrógeno generado con bajas emisiones de carbono, incluyendo tanto las emisiones en el punto de producción como la metodología para su cálculo. Adicionalmente, se han realizado estudios para evaluar el impacto de las políticas existentes en el desarrollo de la producción de hidrógeno, incluyendo la "Industrial Carbon Capture Business Model (ICC BM)"⁶ y el "UK Emissions Trading Scheme (ETS)"⁷.
- **Apoyo a la inversión e innovación.** En 2023 se actualizó el "Hydrogen Investor Roadmap"⁸ donde se recogen los detalles sobre la financiación a proyectos de hidrógeno, respaldando hasta £11 mil millones de inversión privada para 2030. Además, en abril de 2023, se publicó el plan "Powering Up Britain: Net Zero Growth"⁹ donde se detallan los últimos avances en la entrega de apoyo financiero para fomentar la primera implementación a gran escala de instalaciones de producción de hidrógeno electrolítico y habilitadas para CCUS.
- **Regulación del hidrógeno en la red gasista.** De acuerdo con la normativa "Gas Safety (Management) Regulations 1996", el contenido actual de hidrógeno en las redes de gas está limitado al 0,1% en volumen. No obstante, a través del "Ten Point Plan"¹⁰ se está impulsando la realización, para finales de 2023, de las pruebas necesarias para mezclar hasta un 20% de hidrógeno en la red de distribución de gas.
- **Normativa para adaptar el hidrógeno al transporte.** Desde 2008, el Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO)¹¹ fija la obligación de demostrar que un porcentaje de los combustibles distribuidos proviene de fuentes renovables. Adicionalmente, en julio de 2022, el "Department for Transport" publicó el "Targeting net zero - next steps for the Renewable Transport Fuels Obligation: Hydrogen and renewable fuels of non biological origin"¹².

¹EU Commission, "Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs" (2023)

²EU Commission, "Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels" (2023)

³EU Commission, "Commission sets out rules for renewable hydrogen". (2023).

⁴European Commission - "Sustainable and Smart Mobility Strategy". (2021)

⁵HM Government, "UK Hydrogen Strategy" (2023)

⁶Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Carbon Capture, Usage and Storage" (2022).

⁷HM Government, "Developing the UK Emissions Trading Scheme (UK ETS)" (2022).

⁸Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Hydrogen Investment Roadmap" (2023).

⁹Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Powering Up Britain: Net Zero Growth Plan" (2023).

¹⁰HM Government, "The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution" (2020)

¹¹Department for Transport, "Renewable Transport Fuel Obligation: Compliance Guidance" (2022).

¹²Department for Transport, "Targeting Net Zero" (2022).

EE.UU.

- **Estrategia hidrógeno publicada.** En septiembre de 2022, el “US Department of Energy (DOE)” publicó un borrador del “National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap”, sentando las bases estratégicas para el desarrollo del hidrógeno limpio en Estados Unidos.
- **Marco legal y regulatorio.** En noviembre de 2021, el Congreso estadounidense firmó la “Bipartisan Infrastructure Law” (BIL)¹³. Esta legislación histórica, autoriza y asigna \$62 mil millones para el Departamento de Energía de EE. UU. (DOE), incluidos \$9.5 mil millones para hidrógeno limpio.

Además, en agosto de 2022, el presidente promulgó la “Inflation Reduction Act” (IRA) que habilita incentivos adicionales para el hidrógeno, incluyendo un crédito fiscal a la producción que impulsará aún más el mercado estadounidense de hidrógeno limpio.

- **Apoyo a la inversión e innovación.** Para apoyar la inversión e innovación, se han establecido programas como el “Clean Hydrogen Electrolysis Program” que busca mejorar la eficiencia y rentabilidad de las tecnologías de electrólisis, y la asignación de \$8 mil millones para centros regionales de hidrógeno limpio, permitiendo el desarrollo de redes de productores de hidrógeno limpio y su infraestructura conectiva.
- **Regulación del hidrógeno en la red gasista.** Además, se está abordando la regulación del hidrógeno en la red gasista a través de la iniciativa HyBlend, que se enfoca en superar las barreras técnicas para mezclar hidrógeno en los gasoductos de gas natural, incluyendo investigaciones sobre compatibilidad de materiales, análisis técnico-económicos y del ciclo de vida.
- **Normativa para adaptar el hidrógeno al transporte.** El US Department of Energy, ha ido aprobando ciertas leyes e incentivos fiscales para promover y adaptar el hidrógeno al transporte. Entre ellos, se encuentran los créditos fiscales “Alternative Fuel Tax Credit”, que ofrece un crédito de impuestos de \$0.50 por galón para ciertos combustibles alternativos como el hidrógeno licuado, y “Alternative Fuel Tax Exemption” un incentivo fiscal que aplica a equipos de combustibles entre los que se encuentra el hidrógeno licuado. También ha aprobado el “Carbon Reduction Program (CRP)” que incluye actividades de financiación estatal para el despliegue de vehículos de combustible alternativo.

Canadá

- **Estrategia hidrógeno publicada.** En diciembre de 2020 el gobierno canadiense publicó su estrategia de hidrógeno, estableciendo objetivos ambiciosos en términos de producción y uso.
- **Marco legal y regulatorio.** El Gobierno de Canadá ha introducido recientemente tres créditos fiscales destinados a fomentar la transición hacia una economía de emisiones netas cero en su presupuesto de 2023. De mayor relevancia para el hidrógeno se encuentra el Crédito Fiscal de Inversión en Hidrógeno Limpio, un crédito fiscal reembolsable que incentiva la producción de hidrógeno limpio, con créditos que van del 15 al 40%, dependiendo de la intensidad de carbono del hidrógeno.
- **Apoyo a la inversión e innovación.** En cuanto a iniciativas destinadas a fomentar la innovación y propulsar la inversión, se han desarrollado varios programas entre los que se encuentran: (1) Net Zero Accelerator (NZA) es un programa de \$8 mil millones que respalda proyectos que permiten la descarbonización de grandes emisores, tecnología limpia y transformación industrial; y (2) Clean Fuels Fund un fondo de \$1.5 mil millones establecido en 2021 para reducir el riesgo de inversión de capital necesario para construir nuevas

instalaciones de producción de combustibles limpios o expandir las existentes, incluyendo conversiones de instalaciones.

- **Regulación del hidrógeno en la red gasista.** El boletín “G-25 – Policy on the use of gas meters in hydrogen-blending activities in the natural gas network” establece los requisitos temporales y condiciones para permitir inyectar en la red gas natural concentraciones desde 5 a 25% de hidrógeno.
- **Normativa para adaptar el hidrógeno al transporte.** Por último, se ha publicado un plan de reducción de emisiones “Emissions Reduction Plan 2030” en el que se establece un objetivo del 35% de las ventas totales de vehículos medianos y pesados de cero emisiones para 2030, creando así una oportunidad estratégica significativa para los fabricantes de vehículos de pila de combustible de hidrógeno.

Colombia

- **Estrategia hidrógeno publicada.** A principios de 2021, el gobierno colombiano, en colaboración con organizaciones multilaterales e institutos de investigación, comenzó a desarrollar una ruta para establecer las bases del mercado del hidrógeno en el país. En la llamada Ruta del hidrógeno¹⁴ se establecen las bases para:
 - Alcanzar una capacidad productiva de entre 1 GW y 3 GW de producción de hidrógeno verde y de 50 kt de hidrógeno azul para 2030.
 - Fijar un precio objetivo para la generación de hidrógeno verde en 1.7 USD/kg.
 - Llegar a consumir un 40% de hidrógeno verde sobre el total de H₂ consumido actualmente en el sector industrial.
- **Marco legal y regulatorio.** En cuanto al estado normativo actual, la Ley 2099 de 2021, mediante los artículos 21 y 23, abre una cláusula general de competencia al Gobierno Nacional para definir los mecanismos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno.
- **Apoyo a la inversión e innovación.** Además, en el Decreto 1476 de 2022, se establecen las disposiciones dirigidas a definir los mecanismos, condiciones e incentivos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno destinado a la prestación del servicio público de energía eléctrica, almacenamiento de energía y descarbonización de sectores como transporte, gas, hidrocarburos y minería.

Chile

- **Estrategia de hidrógeno publicada.** El gobierno chileno presentó en octubre de 2020 una serie de políticas con el objetivo de crear una industria de hidrógeno verde, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Esta está dividida en 3 etapas, y cada una de ellas cuenta con un objetivo diferente:
 - Primera (2020 – 2025): se pretende acelerar el uso del H₂ verde en las refinerías, en la producción de amoníaco y en los vehículos de transporte. También se fomenta la adopción del blending, con hasta un 20% de presencia de hidrógeno en las redes de gas.
 - Segunda (2025 – 2030): la experiencia adquirida permitiría entrar con fuerza en mercados internacionales por medio de la exportación, contando para la fecha con una capacidad productiva de H₂ mediante electrólisis de hasta 5 GW.

¹³BIL: Bipartisan Infrastructure Law signed by President Biden on November 15, 2021.

¹⁴Ministerio de energía, Gobierno de Colombia, “Hoja de Ruta del hidrógeno en Colombia”. (2021).

- Tercera (2030 en adelante): el objetivo sería posicionar a Chile como líder global en la exportación de combustibles limpios, logrando 25 GW de producción de hidrógeno por medio de electrolizadores, así como un precio del hidrógeno verde inferior a los 1.5 USD/kg.

- **Marco legal y regulatorio.** En cuanto a la normativa, la Ley 21.305 de Eficiencia Energética, publicada en febrero de 2021, definió el hidrógeno como un combustible, lo que permite que el Ministerio de Energía regule su uso, revise y actualice la normativa del mercado eléctrico para permitir la participación del hidrógeno en el sector, actualice la regulación del gas natural para introducir cuotas de hidrógeno verde y facilite la tramitación de permisos para proyectos que lo involucren.
- **Apoyo a la inversión e innovación.** En el marco de la reactivación económica sostenible y la estrategia nacional de hidrógeno, CORFO (Corporación de Fomento de la Producción) promueve el acceso a financiación para proyectos de hidrógeno, acelerando la implantación de iniciativas para la producción de Hidrógeno Verde y facilitando la creación de alianzas industriales y comerciales a lo largo de su cadena de valor.
- **Normativa para adaptar el H₂ al transporte.** En la Ley 21.305 de Eficiencia Energética quedan recogidos Beneficios tributarios para automóviles “cero emisiones”, entre los que se incluyen los automóviles de Hidrógeno.

China

- **Estrategia de hidrógeno publicada.** La Comisión Nacional de Reforma y Desarrollo y la Administración Nacional de Energía publicaron de forma conjunta en 2022 el Plan de medio y largo plazo para el desarrollo de la industria de la energía del hidrógeno (2021-2035). Es el primer plan a medio-largo plazo para implementar el uso del hidrógeno en China hasta 2035. Años antes, en 2018, se creó The National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell (NAHFC). Por otro lado, el gobierno chino ha declarado el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono en 2060 alcanzando el máximo de emisiones en 2030.
- **Marco legal y regulatorio.** China no tiene un marco legislativo global definido para el hidrógeno, por lo que algunas provincias han decidido incluir su propia estrategia en el 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Outline of Long-Term Goals for 2035. En los documentos se recopilan avances sobre el desarrollo de la industria del hidrógeno local, la construcción de plantas y su operativa. Por ejemplo, el NEV industry action plan publicado por la provincia de Shanxi en 2019, esbozó planes sobre el uso de pilas de hidrógeno en vehículos y la provincia de Guangdong también realizó un ejercicio similar a través del “Implementation Plan for Accelerating the Development of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Industry”, publicado en 2020.
- **Apoyo a la inversión e innovación.** La mayor fuente de inversión proviene de los “National Key R&D Programs (NKPs)”, fondos de investigación aplicada que son una importante fuente de financiamiento público en I+D. Desde 2016, se han anunciado más de 60 proyectos NKP centrados en tecnologías de hidrógeno. Estos proyectos promueven la investigación en tecnologías de electrolizadores y buscan mejorar la producción de hidrógeno renovable.
- **Regulación del hidrógeno en la red gasista.** Se están llevando a cabo proyectos donde el transporte de hidrógeno se realiza por red gasista mediante blending con gas natural. La China National Petroleum Corporation transportó hidrógeno en la ciudad de Yinchuan, en el noroeste de China. El hidrógeno se transportó con éxito al mezclarlo en un gasoducto de gas natural.
- **Normativa para adaptar el hidrógeno al transporte.** Desde la publicación del 13th Five-Year Plan (2016) se han estimulado los impulsos para el desarrollo de los vehículos propulsados por hidrógeno alcanzando 7700 FCEVs a finales de 2020.

Australia

- **Estrategia de hidrógeno publicada.** Australia ha desarrollado una estrategia nacional de hidrógeno que establece un marco para el desarrollo, la producción y la exportación de hidrógeno verde.
- **Marco legal y regulatorio.** Hoy en día, existe la “Commonwealth Hydrogen Regulation” en donde se proporciona orientación regulatoria para poder entender que leyes federales vigentes se pueden aplicar a proyectos de hidrógeno. Además, en el presupuesto de 2023-24, se destinaron \$38.2 millones para la creación de un esquema de Garantías de Origen que certificará la energía renovable y rastreará y verificará las emisiones de productos de energía limpia. Este esquema es esencial para el comercio internacional de hidrógeno, ya que proporcionará una medida de confiabilidad y sostenibilidad para el hidrógeno producido en Australia. Además, ayudará a los nuevos proyectos a asegurar financiación y mejorará la efectividad de los esfuerzos del gobierno para escalar las energías renovables y la industria del hidrógeno.
- **Apoyo a la inversión e innovación.** Australia ha establecido el programa "Hydrogen Headstart" de \$2 mil millones, que impulsa la producción y el uso de hidrógeno verde como fuente de energía limpia y sostenible en el país, al mismo tiempo que estimula la inversión en proyectos relacionados con el hidrógeno a gran escala.
- **Regulación del hidrógeno en la red gasista.** En 2022, el Ministerio de Energía reformó la “National Gas Law and Regulations”. Las reformas garantizarán que las disposiciones regulatorias existentes y las protecciones al consumidor funcionen según lo previsto cuando se incorporen el hidrógeno y los gases renovables en la red de gas. Anteriormente, la “National Gas Law (NGL)” y la “National Energy Retail Law (NERL)” se referían solo al “gas natural”. Con proyectos en marcha para introducir hidrógeno y biometano en las redes de gas, esta terminología se ha actualizado para brindar certeza regulatoria a la industria emergente.
- **Normativa para adaptar el H₂ al transporte.** Dentro del “Commonwealth regulations”, se encuentra un apartado dedicado únicamente en abarcar todas las regulaciones federales que rigen los vehículos impulsados por hidrógeno, o embarcaciones impulsadas por hidrógeno o amoníaco, o el transporte de hidrógeno o amoníaco como carga.

- ▶ Desarrollo de normativas específicas que fomenten el transporte con vehículos sin emisiones, asegurando un espacio para los impulsados por pilas de hidrógeno.
- ▶ Creación de marcos específicos para el transporte marítimo con buques impulsado por gases, enmarcando al hidrógeno verde entre los mismos.
- ▶ Evolución de las regulaciones de transporte de gas por tubería para determinar las condiciones de conexión / inyección de los productores de hidrógeno en la red (*blending*, conexión e inyección, equipamiento, porcentajes máximos, peajes aplicables, consideraciones de seguridad, etc.).

Muchos países ya están abordando estos retos, publicando estrategias de hidrógeno en las que se definen medidas y objetivos concretos para fomentar el hidrógeno verde, creando un marco legal y regulatorio con normativas específicas para el tratamiento del hidrógeno a lo largo de la cadena de valor y definiciones específicas para el hidrógeno verde, apoyando la inversión e innovación, fomentando mecanismos de garantías de origen, impulsando el transporte con vehículos sin emisiones, etc.

Aunque algunos países han mostrado mayor compromiso que otros, los impulsos regulatorios y estratégicos persiguen un mismo objetivo: conseguir la descarbonización apalancándose en el hidrógeno. Para poder tener una visión global del posicionamiento de algunos países, se han recopilado diversas acciones en curso o propuestas futuras que se han planteado en relación con el hidrógeno renovable, entre las cuales destacan:

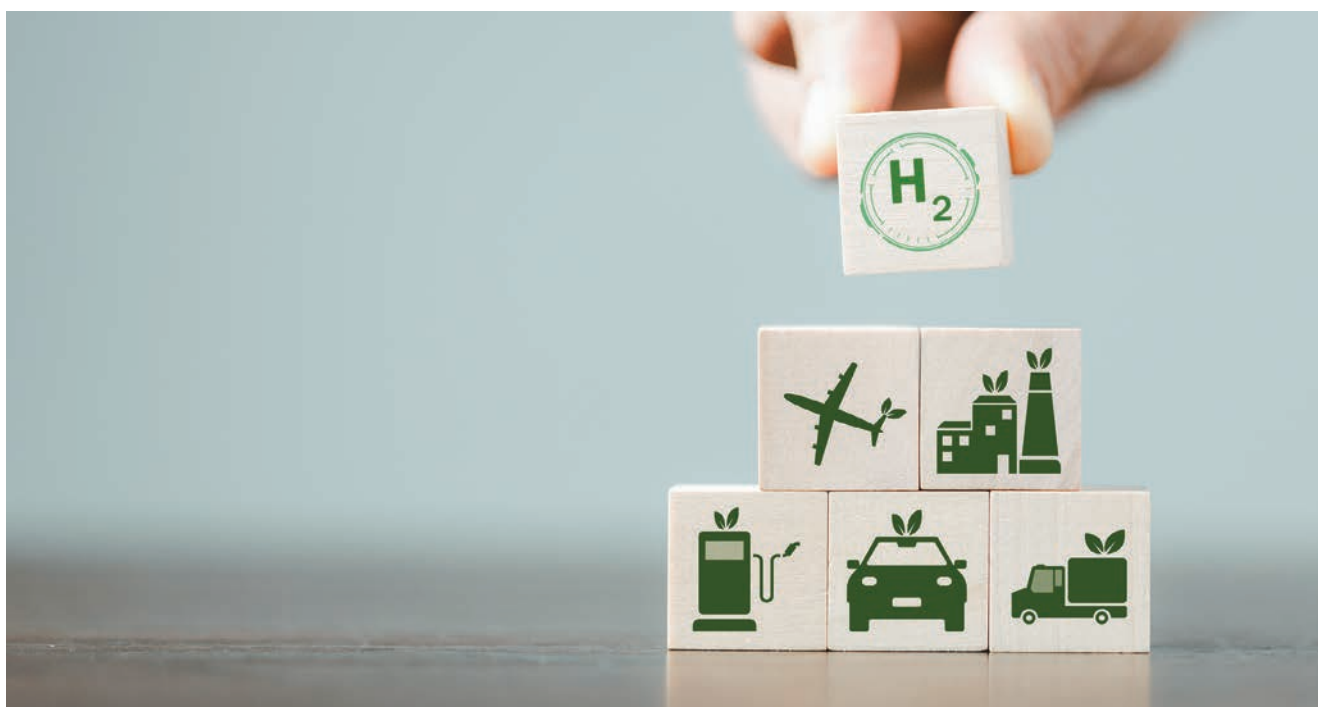
- ▶ Publicación de estrategias nacionales de hidrógeno donde se definen medidas y objetivos diseñados por cada país para

fomentar la producción, distribución y uso del hidrógeno como combustible limpio y sostenible. Dentro de estas estrategias se definen los objetivos nacionales de capacidad instalada de hidrógeno para el horizonte 2030.

- ▶ Creación de un marco legal y regulatorio donde se incluyan medidas legales para facilitar la producción y distribución de hidrógeno, así como el establecimiento de estándares de seguridad y calidad.
- ▶ Apoyo a la inversión e innovación para respaldar e impulsar el desarrollo de tecnologías innovadoras y más sostenibles para fomentar los proyectos de hidrógeno en toda la cadena de valor.
- ▶ Regulación del hidrógeno en la red gasista (*blending*) donde se definan los requisitos técnicos y de seguridad para mezclar hidrógeno con gas natural en las redes de distribución de gas.
- ▶ Adaptación del hidrógeno como combustible para el transporte, estableciendo regulaciones para la instalación de puntos de suministro y la infraestructura necesaria para el transporte de hidrógeno verde.

Finalmente, cabe destacar que las empresas también se enfrentan a desafíos significativos en su estrategia, operaciones y compromiso con la sostenibilidad en este nuevo panorama energético:

- ▶ **Definición de su estrategia:** las organizaciones deberán definir su posicionamiento estratégico con respecto al hidrógeno, entendiendo los proyectos existentes, manteniéndose actualizado sobre las novedades regulatorias, analizando el mercado potencial y los posibles



clientes u *off-takers*, evaluando posibles alianzas comerciales para fortalecer su posición, etc.

- ▶ **Implantación de la estrategia:** la implantación de la estrategia conllevará el desarrollo de nuevos proyectos, cuyas decisiones de inversión deberán venir acompañadas de los análisis técnico-económicos correspondientes, como pudiera ser la evaluación del emplazamiento óptimo para la producción de hidrógeno renovable o el análisis y solicitud de las potenciales ayudas financieras disponibles.
- ▶ **Ejecución de proyectos:** la gestión del portafolio de proyectos deberá contar con una correcta identificación, evaluación y gestión de los posibles riesgos en los mismos, aplicando metodologías de gestión específicas.
- ▶ **Gobierno y organización:** la ejecución de la estrategia definida puede requerir reorganización interna y la contratación de talento capacitado. También se deberá considerar el impacto en el gobierno de la información y la calidad de los datos asociados al hidrógeno.
- ▶ **Operación y gobierno del negocio:** a nivel operativo, será necesario adaptar los procesos y sistemas para controlar la calidad, seguridad y rentabilidad de los proyectos, desarrollar estrategias comerciales adaptadas, valorar los contratos de hidrógeno, modelizar los precios, evaluar la ejecución de coberturas, etc.
- ▶ **Vinculación con objetivos de sostenibilidad:** el desarrollo del hidrógeno también ofrece una oportunidad para que las empresas cumplan con sus objetivos de sostenibilidad, para lo que deberán monitorizar el cumplimiento de sus compromisos adquiridos e indicadores clave.

Timeline del marco regulatorio y legislativo europeo sobre el hidrógeno

En la Unión Europea se han abordado distintas acciones para adoptar un marco regulatorio sobre el hidrógeno:

- ▶ En diciembre de 2015, se logró el Acuerdo de París⁵¹, un acuerdo mundial sobre el cambio climático con el objetivo de reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.
- ▶ En diciembre de 2018, se revisó la Directiva Europea de Energías Renovables (RED)⁵² y se incluyó un nuevo objetivo global para la UE de consumo de energía renovable para 2030 del 32%, incluyendo un apartado para el transporte.
- ▶ En diciembre de 2019, la Comisión Europea propuso el Pacto Verde Europeo⁵³, un paquete de iniciativas políticas destinadas a posicionar a la UE como la primera región climáticamente neutra para 2050, identificando al hidrógeno como un medio para combatir el cambio climático.
- ▶ En julio de 2020, se publicó la Hoja de Ruta Europea del Hidrógeno⁵⁴, situando a esta fuente de energía como uno de los ejes centrales del plan de descarbonización de la UE.
- ▶ En diciembre de 2020, se integró el hidrógeno en los Proyectos Importantes de Interés Común Europeo (IPCEI)⁵⁵.

⁵¹United Nations, "The Paris Agreement" (2015).

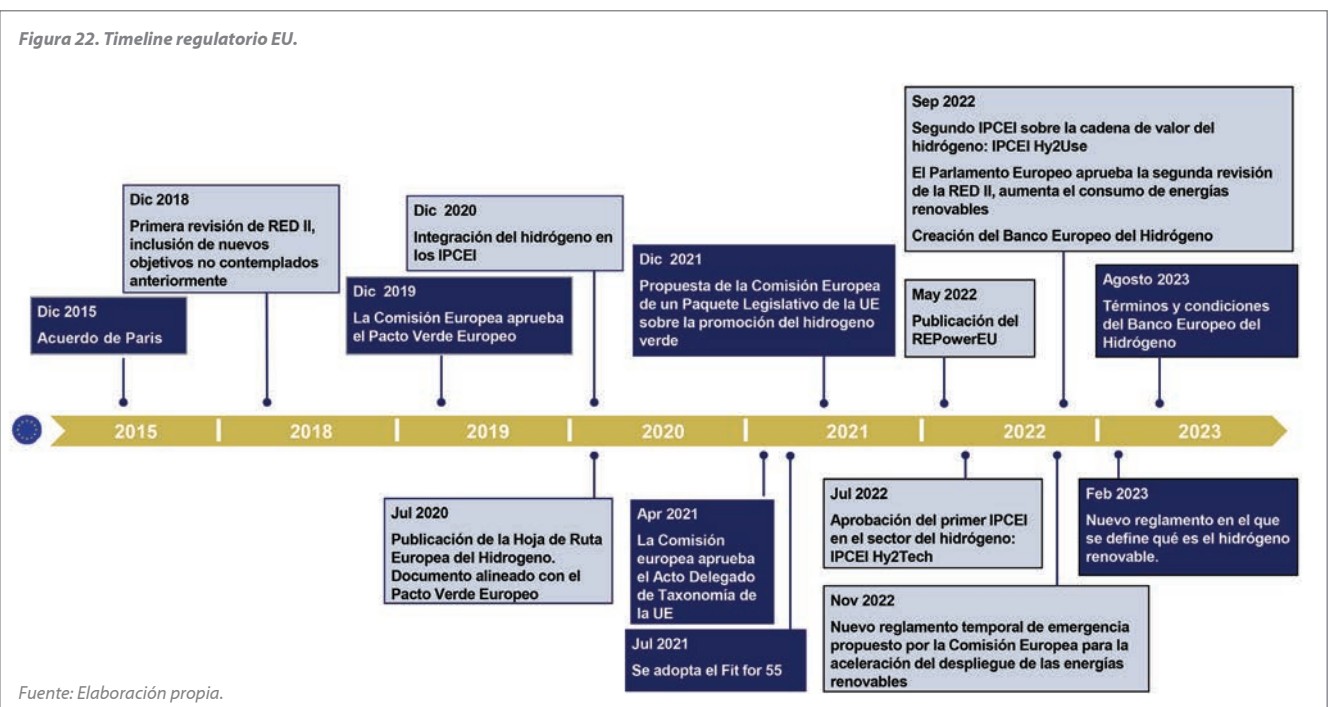
⁵²RED: "Renewable Energy Directive". Aprobada en 2016, es un documento legislativo que define los objetivos de la política energética de la Comunidad Europea en el campo de las energías renovables y el marco legal para su desarrollo.

⁵³EU Commission, "A European Green Deal" (2019).

⁵⁴EU Commission, "Hydrogen" (2020).

⁵⁵EU Commission, "IPCEIs on Hydrogen" (2020).

Figura 22. Timeline regulatorio EU.



Fuente: Elaboración propia.

- ▶ En abril de 2021, la Comisión Europea aprobó el Acto Delegado de Taxonomía de la UE⁵⁶, fomentando la producción de hidrógeno renovable, pero permitiendo que las plantas de hidrógeno azul de alta eficiencia también cumplan con los estándares de clasificación europeos.
- ▶ En julio de 2021, se adoptó el paquete "Fit for 55"⁵⁷, un conjunto de propuestas legislativas y modificaciones de la legislación comunitaria vigente que ayudarán a la UE a reducir sus emisiones netas de gases de efecto invernadero y alcanzar la neutralidad climática.
- ▶ En diciembre de 2021, la Comisión Europea propuso un Paquete Legislativo de la UE sobre la descarbonización del gas y la promoción del hidrógeno verde⁵⁸, con el objetivo de crear un mercado de hidrógeno y desarrollar una infraestructura especial, y estableciendo la creación de una Red Europea de Gestores de Redes de Hidrógeno (REGRH) para garantizar el desarrollo y la gestión de la red de hidrógeno.
- ▶ Además, en 2021, se aprobó el primer proyecto para garantías de origen verde en la UE, "CertifHy".
- ▶ En mayo de 2022, se publicó el documento REPowerEU⁵⁹, estableciendo una meta de 10 millones de toneladas de producción nacional de hidrógeno verde para 2030 y revisando al alza los objetivos fijados por la Hoja de Ruta del hidrógeno.
- ▶ En julio de 2022, se aprobó el IPCEI Hy2Tech⁶⁰, en el que se incluían 41 proyectos de innovación para desarrollar tecnologías de hidrógeno. Además, en septiembre de 2022, se aprobó también el IPCEI Hy2Use que complementaba al IPCEI Hy2tech para el desarrollo de infraestructura de hidrógeno.

- ▶ En septiembre de 2022, el Parlamento Europeo aprobó la revisión de la RED II⁶¹ para aumentar la participación de las energías renovables en el consumo final de energía de la UE al 45 % en 2030 (frente al 32 % propuesto inicialmente)
- ▶ En noviembre de 2022, la Comisión Europea ha propuesto un nuevo reglamento temporal de emergencia para acelerar el despliegue de las fuentes de energía renovables⁶².
- ▶ En febrero de 2023, se recoge en dos actos delegados la definición de hidrógeno renovable. En el primer acto se dan los requisitos para considerar como combustible renovable a aquellos basados en hidrógeno⁶³. En el segundo se define cómo se debe calcular la reducción de emisiones al utilizar este tipo de combustibles⁶⁴.
- ▶ En agosto de 2023, se publicaron los términos y condiciones del European Hydrogen Bank, el cual pretende fomentar y apoyar las inversiones a la producción de hidrógeno renovable.

⁵⁶EU Commission, "Acto Delegado de Taxonomía de la UE" (2021).

⁵⁷EU Commission, "Fit for 55" (2021).

⁵⁸EU Commission, "Preguntas y respuestas sobre el paquete relativo al hidrógeno y al gas descarbonizado" (2021).

⁵⁹EU Commission, "REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition" (2022).

⁶⁰EU Commission, "Remarks by Executive Vice-President Vestager on IPCEI in the hydrogen technology value chain" (2022).

⁶¹Balkan Green Energy News, "European parliament votes to raise renewables 2030 target to 45 %" (2022).

⁶²EU Commission, "REPowerEU: Commission steps up green transition away from Russian gas by accelerating renewables permitting" (2022).

⁶³EU Commission, "Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs" (2023).

⁶⁴EU Commission, "Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels" (2023).

