



Producción integrada de hidrógeno y metano con biomasa y residuos

El metano y el hidrógeno verdes son vectores energéticos con muchas aplicaciones y pueden obtenerse de fuentes subutilizadas. Su producción y uso fomentan una economía circular, reducen emisiones, mejoran la gestión de residuos e incrementan la eficiencia de recursos. En este escenario, el proyecto All-to-Gas propone un enfoque integrador en la producción y gestión de ambos gases

Palabras clave

Bioenergía; Economía circular; Eficiencia de recursos; Energía verde; Gestión de residuos; Reducción de emisiones

D. Hidalgo Barrio, J.M. Martín-Marroquín, D. Díez y A. Uruña
CARTIF Centro Tecnológico, Área de Economía Circular, Boecillo (Valladolid)

Tanto el metano verde como el hidrógeno verde son dos gases que están teniendo una fuerte presencia en el escenario energético actual. Ambos tienen un origen renovable, y su formación puede estar asociada a procesos de captura y almacenamiento de CO₂, uno de los principales objetivos de nuestra sociedad en la lucha contra el calentamiento global. El metano y el hidrógeno renovables pueden “reverdecer” el sector industrial, y pueden hacerlo juntos, ya que el metano verde tiene la capacidad de ser utilizado directamente como sustituto del gas natural, o puede ser utilizado como almacenamiento químico temporal de hidrógeno para producir este gas cuando sea necesario a través de procesos de reformado. Por otro lado, el hidrógeno puede, a su vez, ser utilizado directamente como fuente de energía o transformado en metano mediante la reacción con CO₂. Esto abre una ruta de doble sentido que conecta ambos gases

renovables, y puede ayudar a hacer el modelo energético industrial más flexible. Pero el éxito en el uso de hidrógeno y metano verdes estará necesariamente ligado a favorecer la producción de ambos vectores energéticos utilizando recursos locales, como la biomasa (entendida en sentido amplio, que incluye residuos biodegradables) o residuos no reciclables (como textiles o algunos plásticos).

El éxito de estos gases renovables también está relacionado con la aplicación de la tecnología más adecuada en cada momento. El desarrollo tecnológico es esencial para aumentar la eficiencia de los procesos de generación de gas renovable, reducir el tamaño de los equipos o suavizar las condiciones de operación para lograr mayores niveles de sostenibilidad y facilidad de uso. Además, una vez producidos, ambos gases deben poder ser fácilmente distribuidos para que lleguen al usuario final de la misma manera que, por ejemplo, el



gas natural. Aunque la infraestructura de gas actual puede ser utilizada para una mezcla de gas natural y metano verde (o para 100 % metano verde) sin necesidad de adaptaciones técnicas importantes siempre que se cumplan las especificaciones de calidad del gas, se aplican limitaciones técnicas estrictas para las mezclas con hidrógeno. Por lo tanto, las redes existentes solo pueden ser utilizadas para transportar mezclas de gas natural e hidrógeno hasta cierto límite. Para porcentajes más altos, o para el transporte de 100 % de hidrógeno, se requieren modificaciones técnicas y/o nuevas infraestructuras, lo que retrasará el uso generalizado de este gas.

En este escenario surge el proyecto All-to-Gas, que pretende sentar las bases para un modelo energético industrial basado en el uso sinérgico de metano e hidrógeno verdes generados a partir de biomasa o fracciones residuales, investigando tecnologías clave que pueden facilitar este cambio de paradigma.

POTENCIAL DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO Y METANO RENOVABLES EN EUROPA

A los ojos de la sociedad, el cambio climático representa el principal argumento para una transición energética que, a menudo, se percibe como no rentable desde un punto de vista financiero, pero como un cambio necesario para el beneficio a largo plazo de la humanidad. En estas condiciones, es absolutamente necesario promover la investigación en tecnologías rentables que permitan el desarrollo de nuevas fuentes de energía sostenibles en la industria, alternativas a los combustibles fósiles, con el objetivo de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo neto de energía a través del uso de materias primas alternativas (como la biomasa y los residuos).

El paso principal hacia la creación de una sociedad neutral en carbono es la implementación de fuentes de energía renovable (RES, de sus siglas en inglés) como sustitutas de los combustibles fósiles. Pero, dada la intermitencia de las RES, el almacenamiento de energía tiene un papel crítico que desempeñar en esta transición. El metano verde y el hidrógeno han sido reconocidos, desde el principio, como una de las opciones más prometedoras para el almacenamiento de energía. El metano verde se encuentra en la intersección de dos desafíos críticos: el tratamiento de la creciente cantidad de residuos orgánicos que producen las sociedades y economías modernas, y la necesidad imperativa de reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Un estudio detallado de la dis-

ponibilidad mundial de materias primas sostenibles para biogás y biometano [1] muestra que el potencial técnico para producir estos gases es enorme y, en gran medida, sin explotar. Estas materias primas incluyen residuos de cultivos, estiércol animal, residuos sólidos municipales, aguas residuales, residuos de la industria agroalimentaria y, para la producción directa de biometano mediante gasificación, residuos forestales. La producción de biometano en 2022 fue de alrededor de 18.4 billones de metros cúbicos (bmc), solo una fracción pequeña del potencial existente, estimado en 167 bcm para 2050, lo que cubriría el 35-62 % de la demanda global de gas natural en Europa [2].

Por otro lado, el hidrógeno, como opción líder de tecnología de almacenamiento de energía, con cero emisiones, ha despertado curiosidad y esperanza para su implementación futura. A pesar del largo y costoso camino de desarrollo hacia una tecnología utilizable y estable, el hidrógeno ha venido demostrando ser una buena elección. Por esta razón, se le atribuye un papel fundamental en el futuro del almacenamiento de energía. Si todos los proyectos actualmente en marcha se realizaran, para 2030 la producción de hidrógeno de baja emisión podría alcanzar entre 16 y 24 Mt por año, con 9 a 14 Mt basadas en electrólisis y 7 a 10 Mt en combustibles fósiles con captura de carbono [3].

TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA Y RESIDUOS EN GASES RENOVABLES

Grandes cantidades de residuos agrícolas y forestales, residuos orgánicos industriales y municipales o digerido, están disponibles, listos para usar, en cualquier parte del mundo. Además, las sociedades y economías modernas producen cantidades cada vez mayores de residuos no reciclables, siendo los plásticos y textiles los más problemáticos en la actualidad. Varios procesos termoquímicos y biológicos, algunos bien conocidos y otros emergentes, pueden aplicarse individualmente para producir metano o hidrógeno verde a partir de biomasa y corrientes de residuos. Sin embargo, en el escenario energético global actual, serían especialmente interesantes aquellas combinaciones de tecnologías que den versatilidad al sistema energético, que permitan el paso de un modelo energético a otro y que permitan el uso de la infraestructura energética actual.

En el caso del metano y el hidrógeno verde, esto podría ser una realidad. Los dos gases no son mutuamente excluyentes, al contrario, el metano verde podría usarse para producir hidrógeno verde. La técnica principal es el reformado de vapor, que separa la molécula de metano

en dióxido de carbono e hidrógeno. Sin embargo, existen nuevas opciones con potencial para una mayor eficiencia. Por ejemplo, usando óxido de hierro como catalizador, el metano verde podría convertirse en hidrógeno renovable, separando el carbono para producir grafito como sub-producto. Además, el reformado seco del metano (DRM) que implica la reacción catalítica de CO_2 y CH_4 podría ser un proceso interesante que actúa como sumidero de dióxido de carbono, al mismo tiempo que genera hidrógeno. A pesar de sus beneficios ambientales y económicos inherentes, el DRM todavía está en sus primeras etapas de desarrollo. Por otro lado, y para demostrar que estos dos vectores energéticos son dos caras de la misma moneda, el hidrógeno también podría reaccionar con CO_2 para producir metano mediante la reacción de Sabatier (proceso de metanación). Este proceso de conversión de H_2 y CO_2 en metano es uno de los procesos más prometedores e interesantes para superar las considerables dificultades asociadas con el almacenamiento y transporte a gran escala de hidrógeno. Pero el rendimiento de este proceso biocatalítico todavía está limitado por la cinética microbiana muy lenta, la transferencia de masa deficiente de H_2 y CO y el conocimiento limitado de las vías de bioconversión óptimas. Esto requiere la ingeniería de nuevas configuraciones de biorreactores de fase gaseosa y la optimización de las condiciones operativas para mantener comunidades microbianas de alto rendimiento capaces de transformar el gas de síntesis en biometano de alta calidad.

A su vez, el gas de síntesis o syngas (mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, entre otros gases) se puede producir mediante gasificación de biomasa vegetal, pirólisis de productos de desecho (a base de carbono) o carbonización hidrotérmica de biomasa húmeda. Para la materia prima con bajo contenido de humedad, el proceso de pirogasificación es especialmente interesante. La pirogasificación implica el procesamiento termoquímico de muchas fuentes diferentes, como residuos de madera, residuos de gestión de residuos y la mayoría de los residuos orgánicos. El rendimiento, la composición y la distribución de los productos dependen de las condiciones de pirogasificación. La fracción líquida generada, el bioaceite, está compuesta por una mezcla muy compleja de derivados oxigenados de hidrocarburos, y tiene un potencial calorífico para ser utilizado como fuente de energía de cogeneración. Finalmente, el biocarbón es un residuo sólido no volátil rico en carbono, compuesto por la biomasa restante que no son hidrocarburos, principalmente partes de lignina, óxidos (generalmente metálicos) y metales pesados, dependiendo de la composición de

la materia prima. La carbonización hidrotérmica (HTC) se considera particularmente adecuada para el tratamiento de biomasa con alto contenido de humedad, evitando así el coste de secado previo al tratamiento térmico. La investigación ha demostrado que los productos líquidos obtenidos del tratamiento HTC son biodegradables debido a sus sustancias orgánicas. Por lo tanto, el tratamiento de la fracción líquida mediante un proceso de digestión anaerobia podría ser una opción muy prometedora para aumentar el nivel de generación de biogás. El carbón o hidrocarbón obtenido se puede utilizar como combustible y como fertilizante, ya que puede retener hasta el 50 % del contenido de N y P del material orgánico inicial. La eficiencia energética se puede aumentar al mejorar la conversión del carbón en el pirogasificador, o reduciendo las pérdidas de energía durante el acondicionamiento del syngas. La inversión de capital puede reducirse si se eliminan algunas unidades de proceso o si se reduce su tamaño y complejidad. En esta línea, el uso de sistemas integrados de limpieza y acondicionamiento ayudará a la economía de todo el proceso, minimizando las pérdidas de energía.

Pero, aparte de la necesidad de tecnologías más eficientes, los principales obstáculos para la adopción del hidrógeno se encuentran en la infraestructura de distribución y el equipo de los usuarios finales; ambos tendrán que adaptarse para hacerlos adecuados para la transmisión de hidrógeno. Por otro lado, el metano verde es indistinguible del gas natural y, por lo tanto, puede reemplazar directamente al gas fósil sin ningún cambio en la infraestructura de gas existente. De hecho, el biometano ya se está inyectando en la red de gas. Por lo tanto, no es poco razonable pensar en un modelo de producción y transporte de metano verde utilizando la infraestructura de gas existente y transformando este gas en hidrógeno en su destino mediante nuevos reformadores que se adapten a este modelo. También es posible el transporte de mezclas de H_2/CH_4 en la actualidad, pero la inyección de H_2 renovable en la red de gas natural (o metano verde) podría requerir una separación H_2/CH_4 rentable en el lugar de consumo. En este contexto, las membranas de separación de gas han surgido como una tecnología atractiva basada en su alta eficiencia, versatilidad, diseño modular y ausencia de demanda de reactivos químicos. Sin embargo, las membranas de última generación, fabricadas a partir de polímeros comerciales convencionales, aún no satisfacen las demandas industriales. Por lo tanto, se están realizando muchos esfuerzos para mejorar la separación del hidrógeno mediante el diseño de nuevos polímeros con un rendimiento superior en términos de compro-

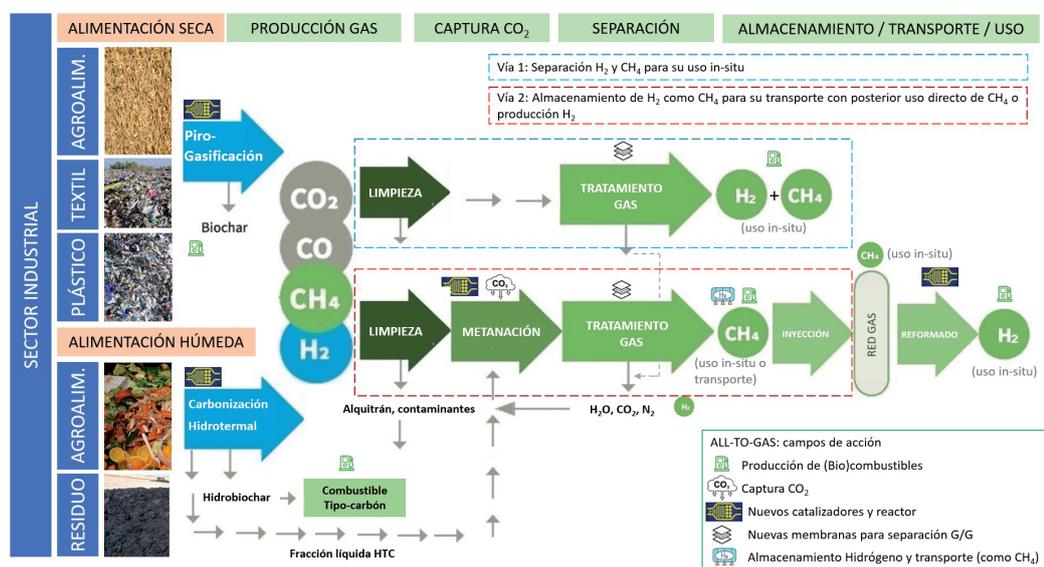


FIGURA 1. Concepto All-to-Gas

miso permeabilidad-selectividad. En los últimos años la mezcla de polímeros y la formación de membranas de matriz mixta (MMMs) han surgido como una estrategia para fabricar membranas de alto rendimiento para la separación de gases. El enfoque de mezcla de polímeros se basa en la creación de una membrana integrada con nuevos beneficios prospectivos, combinando las ventajas de dos polímeros compatibles. Por otro lado, las MMMs son materiales heterogéneos que constan de cargas sólidas dispersas uniformemente en una matriz polimérica continua, explotando en sinergia las ventajas de los polímeros en cuanto a la estabilidad mecánica, selectividad, facilidad de procesamiento y bajo coste, con la fortaleza de las redes porosas dispersas en términos de desempeño en la separación de gases, ya que actúan como tamices moleculares que mejoran la permeabilidad y selectividad de los gases. Ambas estrategias podrían llevar a la creación de membranas híbridas que revelan propiedades sobresalientes, mostrando un potencial prometedor para su uso en la recuperación de hidrógeno.

EL PROYECTO ALL-TO-GAS

De lo anteriormente expuesto se deduce que sería posible producir metano verde e hidrógeno verde de alta calidad a partir de biomasa y corrientes de residuos empleando las tecnologías adecuadas. En este escenario, el proyecto All-to-Gas propone investigar en una combinación revolucionaria de nuevas tecnologías, como se muestra en la Figura 1, algunas de ellas citadas en el apartado previo. La combinación, en un mismo modelo, de tecnologías como la pirolisis, la carbonización hidrotermal, la limpieza, el acondicionamiento y la mejora del *syngas*, la biometanación, el reformado de metano verde y la separación de gases, operando en un sistema integrado, permitirán suministrar gases renovables y otros combustibles que se generan como subproductos, con una alta relación de conversión de materias primas a energía. El tratamiento termoquímico de las materias primas seleccionadas generará una mezcla de gases con

dos opciones en consideración para el uso y distribución de hidrógeno y metano de acuerdo con las necesidades industriales específicas: opción 1): separación de H₂ y CH₄ después de la producción de *syngas* con uso *in situ* de ambos gases, y opción 2): almacenamiento químico de H₂ como CH₄ e inyección de metano verde en la red de gas con reformado en el lugar de destino si se necesita gas de hidrógeno, si no, el metano se puede consumir directamente.

Finalmente, aunque la intención del proyecto All-to-Gas es llevar a cabo investigaciones sobre procesos que permitan la valorización como gases renovables de diferentes tipos de biomasa y residuos, es necesario seleccionar las corrientes con las que trabajar en la práctica. En este sentido, se han seleccionado previamente dos corrientes: digerido de reactores anaerobios (corriente húmeda) y materiales no reciclables de centros de tratamiento de residuos, ricos en plásticos y textiles, junto con residuos de cultivos (corriente seca). Ambas corrientes son muy abundantes en todo el mundo, y su gestión rentable en el contexto de una economía circular se ha convertido en un problema urgente. Los estudios revelan que el proceso de biorrefinería para la gestión del digerido y las fracciones no reciclables aún está poco desarrollado, y aquí es donde el proyecto All-to-Gas puede tener un papel destacado.

Agradecimientos

Este trabajo se está ejecutando en el marco del proyecto All-to-Gas, convocatoria de Líneas Estratégicas financiada por la Agencia Estatal de Investigación, Ministerio de Ciencia e Innovación (Ref. PLEC2022-009349). El proyecto se realiza con la participación de Cartif, Ciemat, Edifesa, Emasesa, Universidad de Sevilla y Universidad de Valladolid.

Bibliografía

- [1] IEA, 2020. Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>
- [2] EBA, 2022 "Statistical Report 2022. Tracking biogas and biomethane deployment across Europe". https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/12/EBA-Statistical-Report-2022_Short-version.pdf
- [3] IEA, 2022. "Global Hydrogen Review 2022". <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>