



Agencia Nacional de
Ciencias de Australia

Informe preliminar con la lista de bienes y servicios asociados a las mejores tecnologías de producción, acondicionamiento, almacenamiento, distribución y reelectrificación de hidrógeno verde y azul.

Dattatray Dhawale, Mandar Risbud, Nawshad Haque y Sarbjit Giddey

31 de enero, 2022

Christian Larsen CSIRO Chile
Comercial de Confianza

Energía

Citas

Informe de escaneo tecnológico de las tecnologías de producción, compresión, almacenamiento y transporte y reelectrificación de hidrógeno para la UPME (Unidad de Planeación Minera y Energética) en Colombia. CSIRO, 2021 Australia.

Aviso de Responsabilidad Importante

CSIRO advierte que la información contenida en esta publicación comprende afirmaciones generales basadas en investigaciones científicas. Se advierte al lector que debe ser consciente de que dicha información puede estar incompleta o no poder utilizarse en una situación concreta. Por lo tanto, no se debe confiar en dicha información ni realizar ninguna acción sin buscar previamente el asesoramiento profesional, científico y técnico de expertos. En la medida permitida por la ley, CSIRO (incluyendo sus empleados y consultores) excluye toda responsabilidad ante cualquier persona por cualquier consecuencia, incluyendo, pero no limitándose a todas las pérdidas, daños, costes, gastos y cualquier otra compensación, que surja directa o indirectamente del uso de esta publicación (en parte o en su totalidad) y de cualquier información o material contenido en ella.

Contenido

Contenido i

Figuras iii

Tablas iii

Agradecimientos	iv
1 Introducción	1
2 Lista de bienes y servicios asociados a las mejores tecnologías de producción de hidrógeno verde y azul	2
2.1 Electrólisis	2
2.1.1 Electrólisis alcalina.....	4
2.1.2 Electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM – basado en polímeros).....	4
2.1.3 Electrólisis de óxido sólido	9
2.1.4 Electrolisis con membranas de intercambio aniónicas (AEM)	10
2.1.5 Electrólisis asistida por carbono e hidrocarburos	10
2.2 Producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles	11
2.2.1 Reformado de metano con vapor y reformado de dióxido de carbono	16
2.2.2 Gasificación del carbón	18
2.2.3 Oxidación parcial (térmica o catalítica)	19
2.2.4 Reformado autotérmico (en seco o a vapor)	20
2.3 Producción de hidrógeno a partir de biomasa y residuos.....	21
2.3.1 Reformado de biogás.....	21
2.3.2 Gasificación de biomasa y residuos.....	22
2.3.3 Pirólisis de biomasa y residuos.....	23
2.4 Producción de hidrógeno por fermentación	24
2.4.1 Fermentación oscura.....	24
2.4.2 Fermentación híbrida clara y oscura	25
2.4.3 Fermentación oscura seguida de una digestión anaeróbica de la biomasa	26
2.4.4 Fotofermentación.....	27
2.5 Producción de hidrógeno a partir de la disociación del agua por energía solar térmica.	28
2.5.1 División solar termoquímica del agua	28

2.5.2	Reformado de metano mediante energía solar térmica concentrada	28
2.6	Producción de hidrógeno a partir de procesos fotoquímicos y fotocatalíticos	29
2.6.1	Separación fotocatalítica del agua	29
2.6.2	Separación fotoelectroquímica del agua.....	30

3 Lista de bienes y servicios asociados a las mejores tecnologías de acondicionamiento, almacenamiento, reelectrificación y distribución de hidrógeno 32

3.1	Tecnologías de compresión del hidrógeno.....	32
3.1.1	Compresores mecánicos	32
3.1.2	Líquido iónico	34
3.1.3	Electroquímica	34
3.1.4	Recipientes presurizados de composición metálica	35
3.1.5	Hidruros metálicos	35
3.2	Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno	36
3.2.1	Almacenamiento físico	36
3.2.1.1	Estructuras metal-orgánicas (MOF).....	36
3.2.2	Almacenamiento químico	37
3.2.2.1	Amoníaco.....	37
3.2.2.2	Éter dimetílico (DME)	38
3.2.2.3	Metilciclohexano (MCH)	39
3.2.2.4	Hidruros metálicos	40
3.2.3	Hidrógeno líquido	42
3.2.3.1	Criocompresión	42
3.2.3.2	Tanques criogénicos	43
3.3	Tecnologías de distribución - transporte de hidrógeno	44
3.3.1	Transporte por tuberías.....	44
3.4	Otras tecnologías de transporte de hidrógeno	45
3.5	Tecnologías de reelectrificación del hidrógeno.....	46
3.5.1	Pilas de Combustible	46
3.5.2	Combustión en Turbinas de Gas.....	49

Figuras

Figura 1 Diagrama esquemático que muestra los componentes de la electrolisis	2
Figura 2 Diagrama esquemático que muestra los distintos componentes de una celda de electrolisis PEM y sus reacciones electroquímicas	5

Tablas

Tabla 1 Indicadores clave de rendimiento de cuatro tecnologías maduras de electrolizadores ..	3
Tabla 2 Parámetros del estado del arte de los electrolizadores PEM	6
Tabla 3 Fabricantes de Sistemas Comerciales de electrolizadores PEM	8
Tabla 4 Objetivos Técnicos: Producción Distribuida de Producción de Hidrógeno por Electrólisis del Agua en Estaciones de Servicio	8
Tabla 5 Diferentes tipos de tecnologías de captura de CO2 con sus aplicaciones	16

Agradecimientos

CSIRO agradece a la Unidad de Planificación Minero Energética (UPME) de Colombia por su patrocinio y colaboración para la realización de este estudio, de forma conjunta con CSIRO Chile.

1 Introducción

El presente reporte corresponde a un entregable parcial en el que se han evaluado y se presentan las principales tecnologías disponibles para la producción, acondicionamiento, distribución, almacenamiento y reelectrificación de hidrógeno verde y azul, que se encuentren en etapas de desarrollo tecnológico avanzado. El nivel de desarrollo fue evaluado según su nivel de madurez tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés, *technology readiness level*) y se presentan aquellas con TRL entre 5 y 9. De forma complementaria, en el presente reporte se presentan adicionalmente, algunas tecnologías con TRL inferiores, pero que a juicio expertos y especialistas han sido consideradas como tecnologías promisorias en materias de descarbonización y transición energética.

Los procesos de captura, almacenamiento o usos del CO₂ (CCUS) no son abordados en este reporte en profundidad. Sin embargo, son mencionados de forma general (Sección 2.2) dado que son esenciales para la producción del hidrógeno azul.

La finalidad del presente reporte es proporcionar información preliminar, conducente al listado de bienes y servicios final. Se espera que este reporte sea sometido a consulta para recibir comentarios por parte de UPME y quiénes UPME considere pertinente. Comentarios que serán atendidos en la versión final del reporte, la que incluirá un detalle exhaustivo de información, tal como se muestra, a modo de ejemplo, en la descripción la “Electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM – basado en polímeros)”.

2 Lista de bienes y servicios asociados a las mejores tecnologías de producción de hidrógeno verde y azul

2.1 Electrólisis

La electrólisis es una opción prometedora para la producción de hidrógeno libre de carbono a partir de recursos renovables y la energía nuclear. El principio básico de funcionamiento de un electrolizador de agua se basa en dos electrodos separados por un electrolito, que es el medio responsable de transportar las cargas químicas generadas (aniones (-) o cationes (+)) de un electrodo al otro. Ante esto, un el electrolizador de agua es un dispositivo electroquímico que convierte el agua en hidrógeno (en el cátodo) y oxígeno (en el ánodo) mediante el paso de una corriente eléctrica, como se muestra en la figura 1. El tamaño de los electrolizadores puede variar desde equipos pequeños, similares a las de un electrodoméstico, los cuales son adecuados para la producción de hidrógeno desde una distribución a pequeña escala, hasta instalaciones de producción central de gran escala, que podrían vincularse directamente a las energías renovables u otras formas de producción de electricidad que no emitan gases de efecto invernadero. Este proceso de separación electrolítica del agua fue desarrollado por primera vez en 1800 por Nicholson y Carlisle, y desde ese entonces la tecnología ha evolucionado significativamente en los últimos dos siglos, como se muestra a continuación [1].

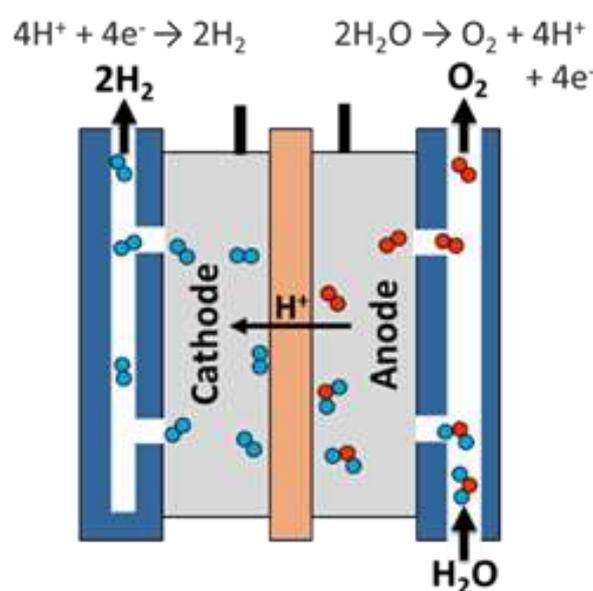


Figura 1 Diagrama esquemático que muestra los componentes de la electrólisis [1]

Aunque el hidrógeno puede generarse a partir de una amplia variedad de fuentes de energía primaria, como el carbón, la biomasa, el gas natural, etc., sólo el hidrógeno verde -producido con electricidad procedente de energías renovables- puede ofrecer realmente un medio hacia una energía sostenible y segura para el clima. Por ende, el hidrógeno verde es la producción de

hidrógeno a través de la energía solar o la energía eólica mediante un proceso de electrólisis. El electrolizador utilizado para la producción de hidrógeno verde puede funcionar de forma dinámica, por lo que requiere tan solo unos segundos para poder operar a máxima capacidad. Por consiguiente, el hidrógeno verde producido por medio de energías renovables es un pilar clave y un activo principal a la hora de dirigir una economía descarbonizada -un combustible que puede alimentar tanto la red eléctrica como el transporte-. El hidrógeno verde producido por medio de energías renovables permite el uso del hidrógeno limpio como materia prima en procesos industriales que contribuyen a la descarbonización de otros sectores, como también puede ser convertido en otros portadores de energía, como el amoníaco o el metanol. También puede utilizarse para producir electricidad usando celdas de combustible.

Un electrolizador hace uso de la electricidad para disociar la molécula del agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂), sin generar subproductos perjudiciales para la atmósfera. De este modo, la electricidad es convertida en energía química asociada a los enlaces de la molécula de hidrógeno. En síntesis, se trata de una tecnología madura que se basa en la generación de hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de corriente continua para disociar el agua. El hidrógeno producido con esta tecnología tiene una alta pureza que puede alcanzar hasta el 99,99 vol.%. Dependiendo del tipo de electrolito utilizado y la temperatura de operación, las tecnologías de electrolizadores pueden dividirse en cuatro tipos distintos de electrolizadores: las alcalinas y las de membrana de electrolito de polímero (PEM), que son comercializadas en la actualidad, como también las celdas de membrana de intercambio aniónico (AEM) y las de óxido sólido, que actualmente se encuentran a escala de laboratorio y prometen un gran avance para esta tecnología. Asimismo, existen otras tecnologías de electrólisis, como la electrólisis asistida por carbono e hidrocarburos. La información sobre los fundamentos de las tecnologías de los electrolizadores y los diferentes tipos de electrolizadores con madurez tecnológica se destacan en el informe de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) [2], y se recogen en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1 Indicadores clave de rendimiento de cuatro tecnologías maduras de electrolizadores [2]

PARAMETERS	ALCALINO	PEM	AEM	SOEC
Celda de presión [bara]	< 30	< 70	< 35	< 10
Eficiencia (sistema) [kWh/KgH ₂]	50-78	50-83	57-69	45-55
Vida útil [miles de horas]	60	50-80	>5	<20
Estimación de los costes de capital para grandes pilas de combustible (sólo pilas, >1 MW) [USD/kW _e]	270	400	-	> 2000
Estimación del rango de costes de capital para todo el sistema, >10 MW, >10 MW [USD/kW _e]	500-1000	700-1400	-	-

PEM: Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones

AEM: Electrólisis de Membrana de Intercambio Aniónico (AEM)

SOEC: Electrólisis de Óxido Sólido

2.1.1 Electrólisis alcalina

¿Qué es?

El agua se descompone en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de corriente eléctrica, utilizando una membrana porosa y un electrolito alcalino.

¿Por qué es Importante?

La electrólisis alcalina es una tecnología bien establecida, siendo empleada a escala industrial.

TRL:9

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cadena de suministro y capacidad de fabricación bien establecidas. • Grandes tamaños de pilas de combustibles disponibles (en el rango de MW). • Estabilidad a largo plazo. • Bajo coste de capital. • Uso de materiales no nobles. • Tecnología madura. 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la flexibilidad operacional. • Permitir temperaturas más altas de operación. • Mejorar las limitantes en la producción de moléculas de oxígeno. • Lograr operar a presiones más altas.
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto requerimiento de carga mínima (20%-40%). • Funcionamiento dinámico limitado (requiere una carga estable). • Electrolito líquido corrosivo. • Grandes espacios ocupados. • No se adapta tan bien a la intermitencia del suministro energético a diferencia de otros métodos electroquímicos. • El cruce de gases significa un menor grado de pureza y una menor eficiencia debido a la reformación de agua. • Baja densidad de corriente. 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Agua, electricidad. • Subproductos: Oxígeno. • Temperatura de funcionamiento: <100°C. • Eficiencia energética: ~69%.

2.1.2 Electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM – basado en polímeros)

La electrólisis PEM es una de las tecnologías de producción de hidrógeno más avanzadas y maduras. La figura 2 muestra el esquema de un electrolizador PEM con sus componentes, y las reacciones anódicas y catódicas asociadas. Una celda típica consiste en el intercambio de protones (H⁺) en la membrana polimérica, que se encuentra entre el ánodo y el cátodo. Al aplicar un voltaje de corriente continua en los electrodos el agua se electroliza, siendo dissociada en hidrógeno y oxígeno, cumpliendo con las siguientes reacciones electroquímicas que ocurren en las interfaces ánodo/electrolito y cátodo/electrolito respectivas.

En el ánodo: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (1)

En el cátodo: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (2)

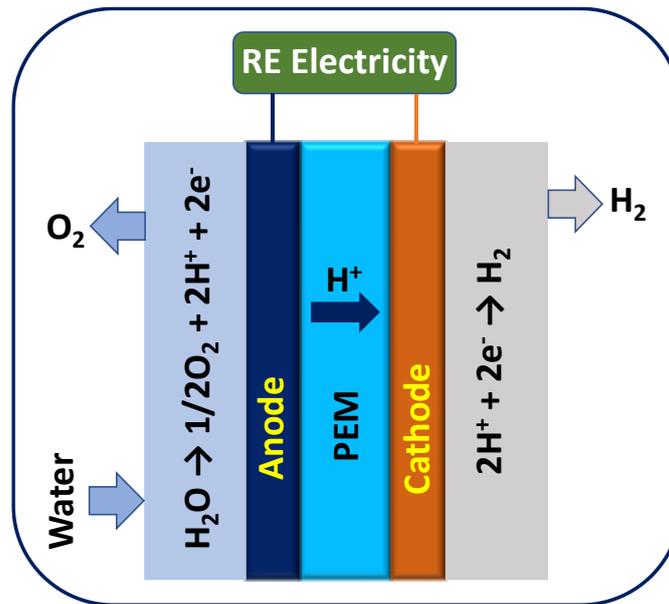


Figura 2 Diagrama esquemático que muestra los distintos componentes de una celda de electrólisis PEM y sus reacciones electroquímicas

Para que las reacciones anteriormente mencionadas se produzcan a tasas prácticas, se requiere un catalizador en la interfaz electrodo/electrolito. La capa del catalizador se dispone directamente en la superficie de la membrana, específicamente en los electrodos de difusión de gas porosos (tela/papel de carbono, o en el soporte metálico (p. ej., malla de Ti o Ti microporoso sinterizado)). El montaje completo de estos componentes se denomina ensamble membrana-electrodo (MEA). Varios MEAs son ensamblados en serie con la ayuda de placas metálicas bipolares (normalmente de titanio), y son también llamadas interconexiones para hacer una pila del electrolizador. Las interconexiones con canales de flujo en ambos lados no sólo mantienen los MEAs unidos, sino también suministran/recolectan reactivos/productos y corriente hacia/desde los respectivos electrodos de los MEAs.

Debido a los entornos corrosivos, los catalizadores de metales nobles (por ejemplo, Pt, Ir y Ru) se utilizan con frecuencia junto a metales o aleaciones de alto costo para la interconexión, y otros materiales para la construcción de las pilas. La membrana conductora de protones más utilizada actualmente es una membrana de polímero de ácido perfluorosulfónico (Nafion de Dupont), que tiene un grosor que varía entre 50 y 200 μm .

Otras membranas conductoras de protones utilizadas son las membranas Flemion, Aciplex, Dow y las membranas basadas en hidrocarburos, como la poliéter éter cetona (PEEK) y el polibenzoimidazol (PBI). Estas membranas ofrecen una conductividad de protones de alrededor de 0.1 S cm^{-1} en estado humidificado. Para los electrolizadores con membrana conductora de protones, se suelen utilizar electrodos de agua/oxígeno (ánodos) con catalizadores basados en iridio/rutenio sobre una malla de titanio poroso platinado o titanio sinterizado, debido a su naturaleza ácida, y el electrodo de hidrógeno (cátodo) comúnmente usado es Pt/C, sobre un papel o tela de carbono poroso. Las interconexiones del conjunto de la pila están hechas de titanio o de aleaciones de este. En la actualidad, se han alcanzado densidades de corriente de hasta 2 A cm^{-2} en celdas con voltajes

en el rango de 1,7 - 2,0 V, mediante celdas individuales que utilizan los materiales ya mencionados. En la Tabla 2 se listan los parámetros del estado del arte de los electrolizadores PEM.

Tabla 2 Parámetros del estado del arte de los electrolizadores PEM [2]

PARÁMETROS	EN 2020	ENFOQUE DE I+D
Densidad de la Corriente Nominal	1-2 A cm ⁻²	Diseño, membrana
Rango de Voltajes (límites)	1.4-2.5 V	Catalizador, membrana
Temperatura de Funcionamiento	50-80 °C	Efecto sobre la durabilidad
Presión de la Celda	< 30 bar	Membrana, catalizadores de reconversión
Alcance de la Carga	5%-120%	Membrana
Pureza H ₂	9.99%-99.9999%	Membrana
Eficiencia de la Tensión (LHV)	50%-68%	Catalizadores
Eficiencia Eléctrica (pila)	47-66 kWh/kg H ₂	Catalizadores/membranas
Eficiencia Eléctrica (sistema)	50-83 kWh/kg H ₂	Balace de la planta
Vida Útil (pila)	50,000-80.000 horas	Membrana, catalizadores, PTL
Tamaño de la unidad de pila	1 MW	MEA, PTL
Área del Electrodo	1500 cm ²	MEA, PTL
Arranque en frío (a carga nominal)	< 20 minutos	Aislamiento (diseño)
Costes de capital (pila) mínimo 1 MW	400-700 dólares/kW	MEA, PTL, BPs
Costes de capital (sistema) mínimo 10 MW	700-1400 USD/kW	Rectificador, depuración de agua

I+D: Investigación y Desarrollo

PTL: Capa de Transporte Porosa

MEA: Conjunto de electrodos de membrana

BP: Placas bipolares

Se ha logrado un progreso significativo en la comercialización de esta tecnología, y en la actualidad diversas empresas venden sistemas de electrolizadores para aplicaciones de conversión de electricidad a gas (Siemens - Silyzer-003, ITM Power - Hgas1000, Proton onsite - serie M, Hydrogenics (actualmente comprada por Cummins Inc.) - 1MW HySTAT, Giner ELX Inc. - 200S), con una capacidad de generación de hidrógeno de hasta 20 kg h⁻¹ a una presión de suministro de 30 bar. A continuación, se resumen más detalles de esta tecnología.

TECNOLOGÍA: ELECTRÓLISIS DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (BASADA EN PEMOLÍMEROS)	
Breve descripción de la tecnología (principios físicos)	Se utiliza electricidad para separar el agua en hidrógeno y oxígeno gaseosos a bajas temperaturas (< 100 °C), utilizando una membrana sólida de intercambio de protones. El hidrógeno se denomina "verde" si la electricidad utilizada para la separación del agua procede de una fuente de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica o los generadores eólicos.
Aspecto y características principales de la tecnología: temperaturas y presiones de funcionamiento, entradas, otros	<p><u>Ventajas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Rápida respuesta a la intermitencia de las energías renovables para los servicios de en red, como la gestión de la carga máxima y la regulación de la frecuencia. • Diseño compacto y modular que permite diversas aplicaciones y una fácil ampliación. • Permite la producción de hidrógeno a presiones superiores a 30 bares, utilizando menos energía que los compresores mecánicos. • Mayor durabilidad (no es propenso a los efectos de los ciclos térmicos, como los procesos a altas temperaturas). • La operación a densidades de corriente más elevadas (rango de multi-A/cm²) permite altas tasas de producción de hidrógeno por unidad de volumen del sistema. • Generación de hidrógeno de alta pureza. • Se ha demostrado que la vida útil es superior a 50.000 horas. • La eficiencia del sistema rodea el 70%. <p><u>Desventajas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Altos costes de capital (>1000 dólares/kW a escala de MW y >20.000 dólares/kW a escala de kW). • Los sistemas a mayor escala aún están en la fase de demostración. • La tecnología utiliza catalizadores de metales nobles que pueden suponer un aumento de los costes de capital debido a las limitadas reservas de estos materiales. • Necesidad de agua de alta pureza, lo que podría ser un problema en determinadas zonas con escasez de agua. <p><u>Entradas y Condiciones:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos necesarios: Electricidad y agua de alta pureza • Subproducto: Oxígeno • Temperatura de operación: Ambiente a 80°C <p><u>Desafíos y Futuras Áreas de Desarrollo:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejora de la durabilidad de los componentes de las celdas • Desarrollo de catalizadores avanzados para mejorar la eficiencia y reducir el uso de metales preciosos (carga del catalizador) • Desarrollo de electro-catalizadores no nobles • Lograr la operación a presiones más altas, mientras que el hidrógeno es permeabilizado al sitio del oxígeno en la celda • Desarrollo de colectores de corriente y placas separadoras de bajo coste y resistentes a la corrosión • Construcción de celdas de gran superficie (>1 m²) para electrolizadores a escala de prevención de variados MW
Desarrolladores o proveedores de esta tecnología (países)	<p><u>Tecnología TRL</u></p> <p>~ TRL: 9</p> <p><u>La lista de las principales empresas manufactureras de los equipos se muestra en el cuadro 3.</u></p>

Tabla 3 Fabricantes de Sistemas Comerciales de electrolizadores PEM

FABRICANTE	SERIE	TASA H ₂ (NM ³ /H)	POTENCIA NOMINAL (MW)	PRESIÓN MÁXIMA H ₂ (BAR)
Giner Inc. (US)	Allagash	400	2	40
Hydrogenics (CA)	HyLYZER-3000	300	1.5	30
Siemens (DE)	SILYZER-200	225	1.25	35
ITM power (GB)	-	127	0.7	20-80
Proton Onsite (US)	M400	50	0.25	30
AREVA H2Gen (FR)	E120	30	0.13	35
H-TEC (DE)	ELS450	14.1	0.06	30/50
Treadwell Corp. (US)	-	10.2	-	76
Angstrom Advanced (US)	HGH170000	10	0.06	4
Kobelco Eco-Solutions (JP)	SH/SL60D	10	0.06	4-8
Sylatech (DE)	HE 32	2	0.01	30
GreenHydrogen(DK)	HyProvide P1	1	0.01	50

Australia adaptó una norma ISO (ISO 22734:2019, MOD) para los generadores de hidrógeno mediante el uso de la electrólisis del agua -Aplicaciones industriales, comerciales y residenciales. Esta norma adopta la ISO 22734:2019 con modificaciones para ese país, que define los requisitos de construcción, seguridad y rendimiento de los aparatos modulares o dispositivos de fábrica para la generación de gas de hidrógeno, que serán denominados de aquí en adelante como generadores de hidrógeno, y que utilizan reacciones electroquímicas para la electrólisis del agua con el fin de producir hidrógeno y gas de oxígeno. La norma es aplicable a las pilas y paquetes de los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) y a los electrolizadores alcalinos. Además, en la Tabla 4 se enumeran los objetivos técnicos del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) y ejemplos de la contribución de los costes de para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua distribuida.

Tabla 4 Objetivos Técnicos: Producción Distribuida de Producción de Hidrógeno por Electrólisis del Agua en Estaciones de Servicio [1]

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	ESTADO 2011	OBJETIVO 2015	OBJETIVO 2020
Costos nivelados de hidrógeno (sólo producción)	\$/kg	4.20	3.90	2.30
Coste capital del sistema electrolizador	\$/kg	0.70	0.50	0.50
	\$/kW	430	300	300
Eficiencia energética del sistema	% (LHV)	67	72	75
Precio de la electricidad	kWh/kg	50	46	44

2.1.3 Electrólisis de óxido sólido

¿Qué es?

La electrólisis de óxido sólido utiliza la energía térmica del calor en combinación con la energía eléctrica de una corriente eléctrica para sintetizar el hidrógeno, utilizando una membrana de cerámica de óxido sólido para el electrolito (*ceramic solid oxide electrolyte membrane*).

¿Por qué es Importante?

La electrólisis de óxido sólido hace uso del calor para reducir significativamente el aporte de energía eléctrica requerida para la producción de hidrógeno.

TRL: 6-8

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se pueden lograr eficiencias eléctricas más altas que los electrolizadores AE/PEM, alcanzando 10 kw por laboratorios de I+D y empresas comerciales emergentes. • Alta eficiencia energética. • Uso de materiales no nobles. • Bajo coste de capital (proyectado) para un sistema a escala de los MW. • Es factible la operación reversible como celda de combustible. • Puede utilizarse para la electrólisis de CO₂ a CO, o la co-electrólisis de CO₂ y H₂O a syngas (H₂ y CO). • Reducción del requerimiento de energía eléctrica gracias a la utilización de la energía térmica, que podría obtenerse del calor residual. 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar el rendimiento de los electrodos. • Demostrar su integración con fuentes de energía verde a escala. • Aumentar la vida útil de los materiales cerámicos para el funcionamiento continuo a alta temperatura. • Comprender el mecanismo fundamental de reacción y el comportamiento de la degradación.
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento a altas temperaturas: el calor suministrado debe ser de una calidad adecuada (temperatura suficientemente alta). • Baja vida útil debido a que los electrodos son mecánicamente inestables (se agrietan), la cerámica es frágil y hay problemas de sellado. • Flexibilidad limitada: se recomienda una carga constante para conseguir mejores eficiencias y evitar la rotura de las celdas. • Los materiales cerámicos tienen una durabilidad relativamente baja, sin embargo, los sistemas SOFC que utilizan los mismos 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entradas: Agua, calor, electricidad, dióxido de carbono (opcional). • Subproductos: Oxígeno, monóxido de carbono (si se introduce dióxido de carbono). • Temperatura de funcionamiento: 700°-800°C. • Eficiencia energética: (hasta un 82% de eficiencia a nivel de sistema declarada hasta la fecha).

materiales ya comercializados han demostrado tener estabilidad suficiente para su comercialización e implementación.	
--	--

2.1.4 Electrolisis con membranas de intercambio aniónicas (AEM)

¿Qué es?

El agua se disocia en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de corriente eléctrica, mediante el uso de una membrana porosa de intercambio aniónico y un electrolito alcalino.

¿Por qué es Importante?

Es más compacto y seguro que la electrólisis alcalina y podría utilizar catalizadores más baratos que en la electrólisis PEM.

TRL: 2-4

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mayor seguridad y eficiencia en comparación con la electrólisis alcalina tradicional • Vida útil del sistema potencialmente prolongada • Se puede utilizar agua destilada o una solución alcalina de baja concentración como electrolito, en lugar del KOH concentrado • Catalizador de metales no nobles 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la conductividad del OH en la membrana polimérica • Mejorar la durabilidad de la membrana: la degradación sigue siendo un problema • Mejorar la conductividad de electrolito/membrana
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coste de capital potencial más elevado en comparación a la electrólisis alcalina • Tecnología no demostrada (membrana) 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Agua, electricidad • Subproductos: Oxígeno • Temperatura de funcionamiento: <100°C

2.1.5 Electrólisis asistida por carbono e hidrocarburos

¿Qué es?

Es la variación de un sistema electroquímico (AE, PEM, SOE), en el que una parte de la energía se obtiene mediante la conversión química del carbón u otras fuentes de carbono, como la biomasa, los alcoholes u otros hidrocarburos. La electrólisis asistida puede ser de alta o baja temperatura.

¿Por qué es Importante?

Se reduce el aporte de la energía eléctrica requerida, gracias a la energía suministrada por la fuente de carbono.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Requiere un 60% menos de entrada de electricidad, debido al uso de energía química en el proceso • Produce un flujo de hidrógeno puro • Produce un flujo de CO₂ separado, a diferencia de lo que ocurre en las centrales eléctricas de carbón • Proceso más limpio y sencillo de extracción de energía química a partir de materias primas carbonosas • Tiene potencial de utilizar el carbono de la biomasa • Tiene potencial para alcanzar densidades de corrientes similares a las logradas en PEM 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la cinética de oxidación del carbono • Optimizar el catalizador del ánodo • Optimizar las condiciones de funcionamiento • Mejorar la tecnología de los electrolizadores convencionales y la integración de los sistemas de energías renovables • Desarrollar materiales para reducir la degradación y mejorar el rendimiento a largo plazo • Mejorar la densidad de corriente
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produce dióxido de carbono o monóxido de carbono (requiere CCUS) • Acumulación de subproductos en las superficies y en la solución (los subproductos varían según la materia prima y el tipo de electrólisis) 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Carbono o hidrocarburo, agua (en forma de vapor), electricidad • Subproductos: Dióxido de carbono o monóxido de carbono • Temperatura de funcionamiento: PEM - Baja (<100°C), SOE - Alta (>500°C) • Eficiencia energética: Varía en función de la implementación con sistemas PEM o SOE

2.2 Producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles

La producción de hidrógeno es la familia de métodos industriales existentes para la generación de hidrógeno gaseoso. En el 2020, la mayor parte del hidrógeno (~95%) fue producido a partir de combustibles fósiles mediante el reformado al vapor del gas natural y otros hidrocarburos ligeros, el reformado autotérmico, la oxidación parcial de hidrocarburos más pesados y la gasificación del carbón. Sin embargo, para que el hidrógeno producido mediante combustibles fósiles sea bajo en emisiones y por ende, se requiere que sus emisiones sean reducidas mediante tecnologías de captura de CO₂, lo que da origen al denominado “hidrógeno azul”.

Existen diferentes alternativas para la captura de CO₂, cuya aplicación varía dependiendo de las condiciones en que se encuentre (presiones, temperatura, composición de gases de entrada, costos, entre otros). La captura de CO₂ puede realizarse en distintas etapas de los procesos industriales que generen estas emisiones, como puede ser; post-combustión, precombustión y oxicomustión.

- **Captura postcombustión:** En procesos de generación de energía térmica (por ejemplo, generación con biomasa, incineración de residuos municipales, etc.) el carbono se captura después del proceso de combustión. Generalmente, el CO₂ de los gases de combustión está diluido con gases inertes como nitrógeno, argón y agua, además del oxígeno.
- **Captura precombustión:** Tiene relación a la separación del CO₂ generado como coproducto de un proceso de conversión. Los gases producidos se caracterizan por una mayor concentración de CO₂ que los obtenidos en procesos de combustión.
- **Oxicombustión:** Se utiliza oxígeno de alta pureza (95-99%) para la combustión en lugar de aire ambiente, lo que da lugar a un gas de combustión que es principalmente CO₂ y H₂O, que se separan mediante la condensación del agua.

Otra alternativa es la captura directa de CO₂ desde el aire que, a diferencia de las opciones anteriores, trabaja con menores concentraciones de CO₂ (del orden del 0.04%), pero con una alimentación prácticamente ilimitada de gases de entrada al no depender de un proceso industrial específico previo para su alimentación. Debido a la baja concentración del CO₂ en la atmósfera, los sistemas de captura de CO₂ desde del aire no pueden permitirse el esfuerzo de preparar o modificar el aire, lo cual descarta a las tecnologías de captura que poseen procesos con demanda energética, como el calentamiento, la refrigeración o la presurización del aire. Esto deja como alternativa a los sistemas que extraen pasivamente bajas concentraciones de CO₂ del aire en condiciones ambientales, tales como la absorción química (disolución preferente de una especie en un líquido) y la adsorción química (adhesión preferente de una especie a un sólido), cuya demanda energética se enfoca en la liberación del CO₂ del material utilizado para la etapa de captura y su posterior regeneración, en lugar de alterar las grandes cantidades de aire entrante.

Una de las principales diferencias de la captura directa de CO₂ con la captura de fuentes puntuales, es que el primero tiene el objetivo de capturar el CO₂ de manera eficiente considerando un suministro ilimitado de alimentación, lo que no implica necesariamente una captura de una fracción elevada del CO₂. Por otro lado, la captura en fuentes puntuales tiene el objetivo de eliminar la mayor cantidad de CO₂ del efluente.

En cuanto a las tecnologías de captura de CO₂, se pueden reconocer principalmente: Absorción con disolventes líquidos, adsorción mediante adsorbentes sólidos, y separación con membranas. Estas áreas poseen importantes actividades de investigación, demostración e ingeniería. Además, están surgiendo tecnologías con potencial para la captura del CO₂, como el bucle químico, la separación a bajas temperaturas (criogénica) y las tecnologías híbridas. Los sistemas con membranas se caracterizan por tener una barrera semipermeable, que permite selectivamente el paso de un componente de una mezcla, siendo en este caso, el CO₂ capturado del gas de combustión y liberado en otro al cambiar su temperatura y/o presión. Para alcanzar una captura eficiente y con altos grados de pureza, son importantes los parámetros de permeabilidad y la selectividad de una membrana. Asimismo, el diseño del proceso debe garantizar una fuerza motriz suficiente.

Adsorción

En el proceso de adsorción se captan las moléculas de CO₂ en la superficie de otro material. Los adsorbentes sólidos son una alternativa para la captura de CO₂, donde las fuerzas intermoleculares del gas y la superficie del adsorbente permiten la separación del CO₂. Este proceso selectivo de los

gases depende de la temperatura, presión parcial, fuerzas superficiales y el tamaño del poro de adsorción. El proceso para los adsorbentes sólidos consiste en un ciclo continuo de adsorción y regeneración, donde se alimenta al material adsorbente de CO₂ con el gas de entrada, hasta que sus poros estén completamente llenos de CO₂. Luego el material es retirado para remover el CO₂ y ser regenerado, de esta manera poder continuar con el proceso de adsorción.

Los adsorbentes son una alternativa con mayor potencial que los adsorbentes acuosos, debido estos últimos poseen mayores problemas, como la baja área de contacto entre el gas y el líquido, baja carga de CO₂ y severa corrosión. Asimismo, los procesos de adsorción a superficies sólidas ofrecen la posibilidad de un bajo consumo energético, bajos costos de operación y aplicación a una variedad de escalas, por lo que es adecuado para la captura de CO₂ en gases a altas presiones y bajas temperaturas. Mientras que la adsorción química es una alternativa eficaz para reducir la energía y el costo de captura del CO₂. Este proceso es adecuado para separar el CO₂ de corrientes diluidas y de bajo caudal.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
+ Proceso reversible	- Baja selectividad para el CO ₂
+ Bajo coste de materiales adsorbentes	- Operación intermitente y necesita regeneración periódica de los adsorbentes
+ Adsorción física tiene gran desarrollo tecnológico y ha sido ampliamente adoptada en la industria	- La baja de presión puede ser significativa para gases de combustión
+ Capacidad de separar el CO ₂ en bajos caudales	- Baja área de contacto entre el gas y el líquido - Adsorción química tiene corrosión severa

Absorción

Absorción Física: En este proceso el CO₂ es fijado físicamente a una corriente solvente, y depende únicamente de la solubilidad del gas y su presión parcial. Para esto, se usan los principios de la Ley de Henry, donde en ausencia de cualquier forma de alteración de las identidades químicas del CO₂ y el solvente, se descompone el CO₂ en el solvente líquido por las fuerzas de atracción de Van Der Waals. Este proceso se emplea generalmente en procesos con altas presiones y tiene la ventaja de eliminar trazas de otros contaminantes, como hidrocarburos de alto peso molecular y compuestos orgánicos, además, la tecnología de absorción física para el CO₂ está bien establecida (por ejemplo, en las plantas de producción de amoníaco), por lo que tiene una alta confianza operativa. Sin embargo, a bajo contenido de CO₂ en la mezcla de gases, la capacidad de absorción de los solventes químicos es mucho más alta, y presenta mayor afinidad con el CO₂.

Absorción Química: Se basa en la reacción del CO₂ y un solvente químico en dos etapas: la interacción en un contactor adecuado de un gas rico en CO₂ con un absorbente que contiene moléculas con afinidad al CO₂, para que sea único químicamente a él. Seguido, el solvente es regenerado bajo diferentes condiciones que libera al CO₂, de esta manera se da su uso cíclico. La carga del disolvente asume una dependencia no lineal con la presión parcial, y a concentraciones que alcanzan la carga de saturación del disolvente, la absorción decrece drásticamente.

En la actualidad, los procesos basados en aminas son los más establecidos y económicamente viables para la absorción química del CO₂, alcanzando una absorbencia de 90%. Esta técnica es versátil, pudiendo ser aplicada a bajas y altas presiones parciales del CO₂. El más conocido es la

monoetanolamina (MEA), que posee una alta reactividad con el CO₂ y tiene bajo costo de producción, por lo que garantiza un funcionamiento estable y de gran escala.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> + Usado ampliamente en procesos industriales, como en el gas natural, la síntesis de gases y la producción de hidrógeno con alto contenido de CO₂ + Los absorbentes físicos son ideales para la captura del CO₂ en gases combustibles con alta presión de vapor 	<ul style="list-style-type: none"> - Módulos de alto coste - La absorción física no es económica para corrientes de gases con concentraciones de CO₂ inferiores a 15% vol.

Membranas

La separación por membranas es un proceso de separación física, donde la mezcla de un gas compuesto por dos o más componentes, son separados por una barrera semipermeable y dispuestos en una corriente de retención y una corriente de permeado. Para eso se usan dispositivos poliméricos o inorgánicos con alta selectividad, que dejan pasar el CO₂ y simultáneamente actúan como barreras que retienen a los otros gases contenidos en la corriente de gas.

Las tecnologías de membranas pueden ser utilizadas para la captura de CO₂ debido a que ofrece una alta selectividad, alta fuerza motriz, simple instalación, bajo coste capital y bajo consumo energético. Asimismo, esta tecnología es adecuada para la captura en flujos de gases a alta presión y con altas concentraciones de CO₂ (superiores al 10% vol.). Sin embargo, esta separación requiere presión para operar, por lo que en el caso de los gases efluentes de procesos de combustión, que se encuentran a presión atmosférica, la presión y concentración de CO₂ son muy bajas y la separación con membrana no es factible.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> + Son usados comercialmente para remover el CO₂ del gas natural a altas temperaturas y concentraciones de CO₂ + Tienen una compacidad, modularidad y potencial de ser aplicado en áreas remotas que lo deja en ventaja respecto a otras tecnologías + Flexibilidad de operación y mantención + Menores costos asociados a menor uso energético 	<ul style="list-style-type: none"> - Captura de CO₂ a gran escala con membranas poliméricas tienen baja estabilidad a altas temperaturas - El compromiso entre la selectividad y la permeabilidad dificulta su uso a gran escala - Su rendimiento es afectado por las condiciones de operación - Baja efectividad en caudales con bajas concentraciones de CO₂

Bucle químico (CLC – Chemical)

La combustión en bucle químico (CLC) es una nueva tecnología de combustión con separación de gases de efecto invernadero. La técnica implica el uso de un óxido metálico como portador de oxígeno, que transfiere oxígeno del aire de combustión al combustible y, por lo tanto, se evita el contacto directo entre el combustible y el aire de combustión. Posteriormente, los productos de

combustión, dióxido de carbono y agua, se mantendrán separados del resto de la chimenea gases, nitrógeno y cualquier resto de oxígeno. Por lo tanto, fácilmente podría condensar vapor y almacenar CO2 lejos de la atmósfera.

La ventaja del proceso CLC es la captura inherente de CO2 sin penalización energética por el proceso de separación. En caso de estar incompleta la combustión en el reactor de combustible, se requiere oxígeno puro externo para completar la combustión en el proceso denominado como un pulido de oxígeno paso.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
+ Captura de CO2 con baja o nula penalización de energía.	- Mayores costos requeridos en compresión de CO2
+ Altas tasas de captura de CO2	

Separación criogénica del CO2

El método de separación criogénica utiliza bajas temperaturas para separar y purificar el CO2 del resto de los gases. En el proceso, el efluente de gases se enfría por debajo del punto de sublimación del CO2, a temperaturas entre los -80 °C (193 K) y los -130 °C (143 K), depositando el CO2 en forma sólida. A continuación, el CO2 se extrae y se recalienta bajo presión para que ser almacenado como un líquido (150 bar y >99% pureza). El proceso requiere un ciclo de refrigeración criogénica para alcanzar las bajas temperaturas y es ideal para la captura de dióxido de carbono en altas concentraciones, con presencia a gran escala en procesos de purificación de gas natural y la industria del etanol, permitiendo la producción de CO2 líquido bajo presión que puede almacenarse o transportarse según sea necesario.

Esta tecnología es una alternativa rentable cuando el gas de alimentación está disponible a alta presión y posee altas concentraciones de CO2.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
+ Produce CO2 líquido que puede ser fácil de almacenar o transportar.	- Requiere una gran cantidad de energía para la refrigeración
+ Alternativa rentable a altas presiones y concentraciones.	- Se necesita incluir etapas previas que garanticen que no exista la humedad en la mezcla de gas de entrada de manera de evitar la formación de hielo.

En la literatura se han sugerido los sistemas híbridos, los cuales combinan dos o más principios de separación. De este modo, cada paso en la separación puede funcionar con mayor facilidad dentro de la ventana operativa óptima. Un sistema híbrido prometedor es la combinación de membranas poliméricas y la separación a bajas temperaturas (“criogénica”). En la tabla 5 se resumen los diferentes tipos de tecnologías de captura de CO2 con sus aplicaciones.

Tabla 5 Diferentes tipos de tecnologías de captura de CO2 con sus aplicaciones (Referencia varias)

Método de Captura	Proceso	Pre-combustión	Oxicombustión	Post-combustión
Absorción	Física (Disolventes orgánicos/fluorados, Selexol, Rectisol, otros)	X		
Adsorción	Química (aminas, MEA, amoníaco, sales de aminoácidos, líquidos iónicos, enzimas, otros)	X		X
	Físicos (zeolites, alumina, activated carbons, Si/Al gels)	X	X	
	Químicos (MOFs, aminas soportadas <i>supported amines</i>)		X	X
	Mixto (Absorventes con soporte líquido, adsorventes suspendidos en un solvente)		X	X
Membranas	Membranas permeables al O ₂	X	X	
	Membranas de transporte del H ₂	X		
	Membranas permeables al CO ₂	X		X
Bucle Químico	Combustión química en bucle (CLC)	X	X	
	Reformado químico en Bucle (CLR)	X		
	Bucle de carbonato de calcio			X
	Reformado por sorción (SER)	X		
Separación Criogénica del CO ₂		X	X	

2.2.1 Reformado de metano con vapor y reformado de dióxido de carbono

¿Qué es?

El gas natural se mezcla con vapor (y/o dióxido de carbono) en presencia de un catalizador a altas temperaturas y presiones moderadas para producir syngas.

¿Por qué es Importante?

Este proceso es bien conocido y se encuentra bien establecido a escala industrial. La mayor parte del hidrógeno producido hoy en día se realiza mediante este método.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reformado con vapor - Alta selectividad del hidrógeno en los productos del syngas – mayores tasas de H₂/CO₂ para la producción de H₂ que el reformado autotérmico o la oxidación parcial • Requiere menos limpieza que las opciones de pirólisis • Reformado de dióxido de carbono: utiliza el CO₂ como reactivo 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar y demostrar la tecnología CCUS para minimizar las emisiones de CO₂ • Desarrollo de nuevas membranas para los reactores • Mejorar el diseño de los aparatos y de las instalaciones para conseguir una mayor flexibilidad en el aumento y la reducción de la potencia. • Integrar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, la energía solar concentrada puede actuar como fuente de energía térmica para el proceso • Establecer un tratamiento ambientalmente adecuado de los residuos de los subproductos • Desarrollar sistemas de separación de hidrógeno baratos y eficaces para obtener hidrógeno lo suficientemente puro para aplicaciones específicas • Mejorar el diseño de los reactores para dar cabida a reacciones altamente exotérmicas o endotérmicas (por ejemplo, introducción escalonada de reactivos, mejor diseño de las superficies de transferencia de calor, intensificación del proceso, materiales avanzados, monitorización/control de la reacción, pretratamiento de los flujos de residuos) • Desarrollar catalizadores más tolerantes a las impurezas y a los amplios rangos de temperatura
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elevadas emisiones de CO₂ (requiere CSS o gestiones adicionales) • Reformado con vapor - Alto uso de agua por kilogramo de hidrógeno producido • Reformación CO₂: mayor demanda de energía, menor cantidad de hidrógeno producido por unidad de gas natural 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Reformado de vapor - Agua, calor, gas natural. Reformado de dióxido de carbono - CO₂, calor, gas natural. • Subproductos: CO₂ (resultante de la etapa de purificación para aumentar la producción de hidrógeno) • Temperatura de operación: ~750°C • Eficiencia energética: 74-85%⁶⁰

2.2.2 Gasificación del carbón

¿Qué es?

El carbón reacciona con cantidades controladas de oxígeno y/o vapor a altas temperaturas para producir syngas (hidrógeno y monóxido de carbono), que también contiene dióxido de carbono, metano y vapor de agua. La gasificación comprende de cuatro etapas: secado, pirólisis, combustión y reacciones de gasificación.

¿Por qué es importante?

Es un proceso bien conocido y establecido a escala industrial.

TRL: 9

Beneficios	Prioridades de I+D+i
<ul style="list-style-type: none">• Proceso industrial establecido• Otros productos químicos generados pueden ser subproductos útiles• Mayor producción de hidrógeno por unidad de carbón en comparación con la pirólisis del carbón• Se produce hidrógeno más limpio que el obtenido por pirólisis del carbón	<ul style="list-style-type: none">• Desarrollar y demostrar medios eficaces para integrar la captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) con el fin de lograr emisiones de carbono nulas o bajas• Desarrollar alternativas al proceso criogénico utilizado para separar el oxígeno del aire• Mejorar el diseño de los aparatos y de las instalaciones para conseguir una mayor flexibilidad en el aumento y la reducción de la potencia.• Integrar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, la energía solar concentrada puede actuar como fuente de energía térmica para el proceso• Establecer un tratamiento ambientalmente adecuado de los residuos de los subproductos• Desarrollar sistemas de separación de hidrógeno más baratos y eficientes para obtener hidrógeno con pureza adecuada a aplicaciones específicas• Mejorar el diseño de los reactores para dar cabida a reacciones altamente exotérmicas o endotérmicas (por ejemplo, introducción escalonada de reactivos, mejor diseño de las superficies de transferencia de, intensificación del proceso, materiales avanzados, supervisión/control de la reacción, pretratamiento de los flujos de residuos)

<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las impurezas del gas de síntesis requieren una mayor separación • Baja eficiencia térmica • Produce alquitrán en el gas del producto • Requiere que el CCUS logre bajas emisiones de carbono • Sigue siendo un mayor emisor de dióxido de carbono que los métodos basados en el gas natural y los métodos renovables después de emplear el CCUS • Alto consumo de agua por kilo de hidrógeno producido 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Carbón, agua, calor • Subproductos: CO₂, carbono, otros hidrocarburos (depende de la temperatura) • Temperatura de operación: >500°C • Eficiencia energética: ~63%.
---	---

2.2.3 Oxidación parcial (térmica o catalítica)

¿Qué es?

Un combustible de hidrocarburo se quema parcialmente en presencia de una cantidad limitada de oxígeno, en un reformador. De esto se produce una combustión incompleta que da lugar a la formación de hidrógeno gaseoso y monóxido de carbono. Puede ser térmico (altas temperaturas) o catalítico (menores temperaturas).

¿Por qué es importante?

Es un proceso industrial establecido con un tiempo de iniciación rápido, y que produce una proporción de syngas ideal para una síntesis química subsiguiente.

TRL:4-5 and 9

El TRL para la oxidación parcial térmica es de 9. La oxidación parcial catalítica es una tecnología con menor madurez, teniendo un TRL de 4-5.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Requiere menos limpieza que las opciones de gasificación o pirólisis • La reacción es exotérmica, por tanto, no requiere un intercambiador de calor y es más compacta • Rápidos tiempos de iniciación • Produce una proporción ideal de syngas para una síntesis química posterior. Por ejemplo, la producción de metanol 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar y demostrar medios eficaces para integrar la captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) con el fin de lograr cero a bajas emisiones de carbono • Mejorar el diseño de los aparatos y de las instalaciones para conseguir una mayor flexibilidad en el aumento y la reducción de la potencia. • Integrar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, la energía solar concentrada puede actuar como fuente de energía térmica para el proceso • Establecer un tratamiento ambientalmente adecuado de los residuos de los subproductos • Desarrollar sistemas de separación de
---	--

	<p>hidrógeno baratos y eficaces para obtener hidrógeno con pureza adecuada a aplicaciones específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar el diseño de los reactores para dar cabida a reacciones altamente exotérmicas o endotérmicas (por ejemplo, introducción escalonada de reactivos, mejor diseño de las superficies de transferencia de calor, intensificación del proceso, materiales avanzados, supervisión/control de la reacción, pretratamiento de los flujos de residuos).
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • La proporción ideal de los syngas para una posterior síntesis química se produce a expensas de menores cantidades de hidrógeno • La manipulación del hollín le añade complejidad al proceso • Requiere oxígeno • Requiere de las CCUS para alcanzar bajas emisiones de carbono 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entradas: Oxígeno, calor (sólo se requiere inicialmente en el caso del sistema catalítico), aceite o gas natural • Subproductos: CO₂ • Temperatura de funcionamiento: Alta para el sistema térmico (sin embargo, el calor proviene de la combustión de la materia prima de hidrocarburos), temperatura inicialmente alta requerida para el sistema catalítico (posteriormente, temperatura autosostenida durante el proceso en curso) • Eficiencia energética: 60-75%

2.2.4 Reformado autotérmico (en seco o a vapor)

¿Qué es?

La combinación de reformado con vapor de agua (SMR) y la combustión del combustible (metano), donde se añade vapor al proceso de oxidación. El calor generado del componente de oxidación suministra la energía necesaria para el proceso de reformado con vapor.

¿Por qué es importante?

El reformado de metano con vapor y la oxidación parcial se integran en un sistema único, en el que se ha incorporado la integración del calor.

TRL: 9

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta selectividad para el syngas • Proporción flexible de H₂/CO₂ para la producción de syngas, para la posterior producción de combustibles sintéticos • Requiere menos limpieza que las opciones 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar el diseño de los aparatos y de las instalaciones para conseguir una mayor flexibilidad en el aumento y la reducción de la potencia. • Desarrollar y demostrar medios
--	--

<p>de pirólisis</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puede utilizar el CO₂ como reactivo • Temperatura del proceso es inferior comparado con la oxidación parcial • El calor de la combustión de los combustibles se utiliza para complementar el componente SMR, lo que resulta en una menor carga de calor parasítico, es decir, menores pérdidas de energía por ineficiencias del sistema • El SMR y los componentes de combustión están integrados en una sola unidad • Baja formación de carbono/hollín, que minimiza la caída de presión y reduce el OPEX • Diseño compacto, ocupa poco espacio en comparación con otros métodos de conversión de combustibles fósiles • Rápida puesta de iniciación 	<p>eficaces para integrar la captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) con el fin de lograr bajas o nulas emisiones de carbono</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar sistemas de separación de hidrógeno baratos y eficaces para obtener hidrógeno con pureza adecuada para aplicaciones específicas • Integrar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, la energía solar concentrada puede actuar como fuente de energía térmica para el proceso • Desarrollar diseños de quemadores para una mezcla óptima y catalizadores para hacer frente a condiciones severas de funcionamiento
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se requiere un amplio sistema de control • Requiere aire u oxígeno • Requiere uso de CCUS para lograr bajas emisiones de carbono 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entradas: Hidrocarburos, oxígeno, vapor, calor • Subproductos: CO₂ • Temperatura de operación: >500°C • Eficiencia energética: 60-75%.

2.3 Producción de hidrógeno a partir de biomasa y residuos

La producción de hidrógeno a partir de la biomasa comienza con el procesamiento de los materiales orgánicos a altas temperaturas, pero sin combustión. Cuando se combina con oxígeno y vapor, la reacción da lugar a monóxido de carbono, dióxido de carbono y gas hidrógeno. Este proceso de gasificación puede tomar el monóxido de carbono producido y combinarlo con vapor adicional para producir más hidrógeno y dióxido de carbono, que se recicla a través del ciclo natural de respiración de las plantas y genera biomasa adicional. Las opciones alternativas pueden incluir agentes biológicos, como las bacterias anaeróbicas, la fermentación, o la pirólisis, que utiliza el mismo proceso de gasificación, pero sin la presencia de oxígeno. Cada uno de estos métodos proporciona hidrógeno gaseoso limpio que puede ser utilizado para el almacenamiento de energía o directamente en celdas de combustible.

2.3.1 Reformado de biogás

¿Qué es?

El biogás es mezclado con vapor en presencia de un catalizador a altas temperaturas (~750°C) y a una presión moderada para producir syngas. El biogás se obtiene a través de la digestión anaeróbica de

la biomasa, por lo tanto, este método es considerado como un compuesto de producción de hidrógeno biológico y de conversión de biomasa.

¿Por qué es Importante?

La biomasa es abundante, regenerativa y elimina el dióxido de carbono de la atmósfera, lo que hace que este proceso sea carbono neutral. El acoplamiento del proceso con las tecnologías de CCUS tiene el potencial de convertirlo en carbono negativo.

TRL*: 8-9

*El TRL de este método varía en función del proceso.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aprovecha el biogás obtenido de la biomasa • Utiliza un proceso de reformado similar al del reformado de metano con vapor • Emisiones de carbono nulas o bajas 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar tecnologías CCUS • Mejorar el proceso de digestión anaeróbica • Desarrollar tecnologías de disociación de metano/CO₂ • Optimizar los parámetros de funcionamiento, como las características del catalizador, la temperatura, el rendimiento y la concentración • Mejorar el diseño del reactor y del proceso para lograr una mayor eficiencia energética • Integrar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, la energía solar concentrada puede actuar como fuente de energía térmica para el proceso.
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • El funcionamiento de los sistemas de reformado de metano por vapor para reformar el biogás es ineficiente a pequeña escala 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Agua, calor, biogás • Subproductos: CO₂ • Temperatura de operación: ~750°C

2.3.2 Gasificación de biomasa y residuos

¿Qué es?

La gasificación de la biomasa para la producción de hidrógeno implica la conversión termoquímica de la biomasa (como los residuos agrícolas y forestales) a syngas, con una cantidad controlada de vapor y oxígeno, y a temperaturas superiores a ~700°C. Posteriormente, se produce una reacción de cambio de estado de agua a gas para aumentar el rendimiento y la concentración de hidrógeno.

¿Por qué es Importante?

La biomasa es abundante, regenerativa y elimina el dióxido de carbono de la atmósfera, lo que hace que este proceso sea carbono neutral. El acoplamiento del proceso con las tecnologías de CCUS

tiene el potencial de convertirlo en carbono negativo. Asimismo, es posible el tratamiento simultáneo de los residuos municipales.

TRL: 6-7 and 9

El TRL de esta tecnología varía en función de la materia prima: TRL 9 para la biomasa leñosa y TRL 6-7 para los residuos sólidos urbanos.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proceso industrial establecido • Utiliza los residuos agrícolas y forestales 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abordar los retos que plantea la comprensión de las características de las diferentes materias primas de la biomasa y la manipulación del proceso (debido a las altas temperaturas requeridas) • Optimizar los sistemas para diferentes materias primas de biomasa • Mejorar la depuración de los gases • Intensificar el proceso (reducir el número de pasos) • Integrar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, la energía solar concentrada puede actuar como fuente de energía térmica para el proceso
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • La acumulación de escoria y alquitrán exige la integración de maquinaria adicional en los procesos convencionales de gasificación • Libera dióxido de carbono (se podría emplear CCS o una gestión posterior para que el proceso sea carbono negativo) - por lo demás, es carbono neutral 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Biomasa, aire, oxígeno y/o vapor • Subproductos: Dióxido de carbono • Temperatura de operación: de 500 a 1400°C • Eficiencia energética: ~52%.

2.3.3 Pirólisis de biomasa y residuos

¿Qué es?

La pirólisis de la biomasa es la descomposición térmica de la biomasa en un entorno no oxidante para producir predominantemente biocarbón, líquido de pirólisis y gas de síntesis. La composición depende de las condiciones de funcionamiento y del tipo de materia prima. La elección del catalizador altera la producción de hidrógeno gaseoso a diferentes temperaturas. Cuando se emplea el reformado de líquidos derivados de la biomasa, la adición de vapor o la oxidación da lugar a un reformado de vapor y produce una corriente de syngas.

¿Por qué es Importante?

La biomasa es abundante, regenerativa y elimina el dióxido de carbono de la atmósfera, lo que hace que este proceso sea carbono neutral. El acoplamiento del proceso con las tecnologías de CCUS tiene el

potencial de convertirlo en carbono negativo. Asimismo, es posible el tratamiento simultáneo de los residuos municipales.

TRL*: 5-8

*El TRL de esta tecnología varía en función de la materia prima: TRL 7-8 para la biomasa leñosa y TRL 5-7 para los residuos sólidos urbanos.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Con mejoras y estabilización, el líquido de pirólisis puede utilizarse como sustituto de los combustibles fósiles, o utilizarse para el reformado de líquidos derivados de la biomasa • Requerimiento de temperaturas más bajas • El biocarbón puede utilizarse en la gasificación de la biomasa o para fertilizar el suelo agrícola 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la modelización y las simulaciones de los efectos del calor, la masa y el momento junto con la cinética • Minimizar la formación de aceite de pirólisis y mejorar la producción de H₂ • Reducción y movilización del proceso (desarrollo de unidades portátiles) • Integrar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, la energía solar concentrada puede actuar como fuente de energía térmica para el proceso
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baja eficiencia térmica debido al alto contenido de humedad de la biomasa que debe ser secada • Produce una cantidad significativa de alquitran en el gas producido • Requerimientos importantes de recursos para recoger y transportar la biomasa a la planta para su pirólisis. • Produce dióxido de carbono (requiere CCUS) 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Biomasa, agua • Subproductos: Dióxido de carbono, carbón vegetal sólido (biocarbón) • Temperatura de operación: >500°C • Eficiencia energética: 35-50%.

2.4 Producción de hidrógeno por fermentación

2.4.1 Fermentación oscura

¿Qué es?

En ausencia de luz, microorganismos como las bacterias descomponen la materia orgánica para producir hidrógeno gaseoso mediante la fermentación oscura. Las bacterias pueden ser modificadas para aumentar su actividad metabólica y conseguir una mayor tasa de producción de hidrógeno.

¿Por qué es importante?

La fermentación oscura permite la producción de hidrógeno utilizando la biomasa como materia prima, sin necesidad de exponerla a la luz solar. Los tanques y las células del sistema podrían transportarse para la generación de hidrógeno in situ.

TRL: 5-7

El TRL de esta tecnología es de 7 para la fermentación oscura convencional, sin embargo, es menor (TRL 5-6) cuando se incorpora la modificación metabólica como parte del diseño del sistema.

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Menor huella que los métodos dependientes de la luz• Puede utilizar una variedad de residuos como recurso• No se necesita luz para que se produzca el proceso• Reactor tiene un diseño sencillo• Funciona sin la necesidad de condiciones anaeróbicas estrictas• Los biocatalizadores son baratos y biodegradables• El proceso se produce a temperatura y presión ambiente• Sistemas de transporte de latas para la generación de hidrógeno in situ	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Mejorar el rendimiento del hidrógeno• Mejorar la tasa de producción• Ingeniería metabólica de bacterias para mejorar el rendimiento o suprimir la actividad de las bacterias consumidoras de hidrógeno• Optimización de las condiciones y pruebas de solidez
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Las bacterias deben mantenerse en condiciones que permitan su supervivencia• El aumento del rendimiento requiere una presión parcial de hidrógeno muy baja para superar las restricciones termodinámicas• Los microbios que consumen hidrógeno deben ser suprimidos eficazmente para garantizar un rendimiento de hidrógeno que pueda ser cosechado	Características <ul style="list-style-type: none">• Insumos: Agua, materia orgánica (biomasa)• Subproductos: Dióxido de carbono• Temperatura de operación: Ambiente

2.4.2 Fermentación híbrida clara y oscura

¿Qué es?

Los procesos de fermentación oscura y foto-fermentación ocurren secuencialmente en una serie de reactores.

¿Por qué es importante?

La fermentación híbrida permite la extracción adicional de hidrógeno de los efluentes del proceso típico de fermentación oscura.

TRL: 5-6

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maximiza el rendimiento del hidrógeno a partir de la materia prima • Utiliza los efluentes no tratados de la fermentación oscura (que de otro modo requerían mayor manipulación o supondrían un peligro para el medio ambiente) • Los biocatalizadores son baratos y biodegradables • Podría utilizar residuos orgánicos como sustrato 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la eficiencia de la conversión del sustrato • Mejorar el diseño del reactor
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Requiere una gran superficie para la foto-fermentación • La viabilidad operacional depende de la irradiación solar para la etapa de foto-fermentación 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Insumos: Materia orgánica (biomasa), agua, luz para la etapa de foto-fermentación • Subproductos: Dióxido de carbono • Temperatura de operación: Ambiente

2.4.3 Fermentación oscura seguida de una digestión anaeróbica de la biomasa

¿Qué es?

La biomasa se procesa a través de la fermentación oscura, seguido de una digestión anaeróbica para la producción de hidrógeno y metano. Luego, el metano puede procesarse para producir más hidrógeno, si es necesario, mediante procesos como el reformado o la pirólisis.

¿Por qué es importante?

La digestión anaeróbica de la biomasa en dos etapas presenta una oportunidad para producir metano e hidrógeno adicionales a partir de la biomasa tras la fermentación oscura.

TRL:4-5

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bajas o nulas emisiones de carbono • Puede llevarse a cabo con altas tasas de carga orgánica • Se puede conseguir un mayor rendimiento energético teórico en comparación con la fermentación oscura de una etapa • Más eficaz para el tratamiento de purines comparado con la pirólisis 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar el biocarbón de la biomasa para mejorar el rendimiento. El biocarbón puede actuar como tampón para mantener las condiciones óptimas de pH, y suministrar carbono, nutrientes y minerales que favorezcan un alto crecimiento bacteriano • Optimizar la temperatura de funcionamiento y el pH del sistema • Optimizar el pretratamiento de la
---	---

	biomasa
Limitaciones <ul style="list-style-type: none"> Las bacterias deben mantenerse en condiciones que permitan su supervivencia 	Características <ul style="list-style-type: none"> Insumos: Biomasa, agua Subproductos: Metano, dióxido de carbono Temperatura de operación: Ambiente, o elevada a aproximadamente 50 a 70°C si se utilizan microbios termófilos

2.4.4 Fotofermentación

¿Qué es?

Los microbios fotosintéticos utilizan la luz solar para descomponer la materia orgánica mediante la fermentación.

¿Por qué es Importante?

La fotofermentación puede ser utilizado para producir hidrógeno a partir de aguas residuales u otros residuos orgánicos, con uso de la luz solar como fuente de energía.

TRL: 6

Beneficios <ul style="list-style-type: none"> Emisiones nulas o bajas de carbono Podría utilizarse en aguas residuales o en aguas que no pueden utilizarse para beber o para la agricultura Convierte el sustrato orgánico Conversión casi completa del sustrato en biohidrógeno Puede extraer hidrógeno adicional de los efluentes de la fermentación oscura 	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none"> Desarrollar fotobiorreactores baratos Mejora de la cepa mediante ingeniería metabólica Investigar la sustitución de la nitrogenasa por la enzima hidrogenasa Superar la baja tasa de producción de hidrógeno Superar la baja eficiencia de la conversión solar a hidrógeno Reducir el coste de los fotobiorreactores
Limitaciones <ul style="list-style-type: none"> Se necesitan grandes superficies El oxígeno inhibe la producción de hidrógeno Variabilidad de funcionamiento en función del suministro de irradiación solar Menos flexible que la fermentación oscura en cuanto al tipo de sustrato. Normalmente es necesario convertir los sustratos complejos en una mezcla de ácidos carboxílicos y alcoholes antes de la producción de H₂ por fotofermentación 	Características <ul style="list-style-type: none"> Insumos: Materia orgánica (hidrocarburos), agua, luz solar Subproductos: Dióxido de carbono Temperatura de operación: Ambiente Eficiencia energética: <10%.

2.5 Producción de hidrógeno a partir de la disociación del agua por energía solar térmica

2.5.1 División solar termoquímica del agua

¿Qué es?

Se utiliza luz solar concentrada para calentar los óxidos de metales de transición (por ejemplo, el óxido de cerio), liberando oxígeno en el proceso. Posteriormente, los óxidos metálicos reaccionan con el agua, que se disocia para re-oxidar el óxido metálico y producir hidrógeno – el ciclo se repite.

¿Por qué es importante?

Este proceso produce hidrógeno utilizando sólo agua y luz solar, y tiene el potencial de ser de bajo coste debido a la simplicidad del sistema.

TRL: 5

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Menos complejo y con menos pasos que la disociación termoquímica híbrida del agua• No requiere un paso de electrólisis (por lo tanto, no hay entrada de electricidad)• Cero emisiones de CO₂• Aprovechar la luz solar concentrada como fuente de calor	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Mejorar las tecnologías de concentración solar térmica• Mejorar la eficiencia térmica• Mejorar la estabilidad a largo plazo de los materiales del reactor• Llevar a cabo investigaciones sobre los materiales fundamentales (por ejemplo, comprender el mecanismo de fusión y adherencia de los materiales)• Desarrollar conceptos generales de sistemas a gran escala
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Requiere altas temperaturas de operación• Depende de la irradiación solar	Características <ul style="list-style-type: none">• Insumos: Agua y luz solar• Subproductos: Oxígeno• Temperatura de operación: ~900 a 1500°C• Eficiencia energética: Teórica superior al 30%. Demostrada aproximadamente un 5%.

2.5.2 Reformado de metano mediante energía solar térmica concentrada

¿Qué es?

Se utiliza la energía térmica procedente de la luz solar concentrada para hacer reaccionar el gas natural con vapor para formar syngas (una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono).

¿Por qué es Importante?

Este proceso permite utilizar la luz solar para proporcionar el calor necesario para el proceso de reformado. El proceso convencional (reformado de metano con vapor) es bien conocido y está establecido a escala industrial.

TRL: 6

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Bien conocido industrialmente, con una variedad de proveedores de tecnología disponibles para el catalizador, el sistema de reacción y los procesos posteriores, incluyendo la producción de amoníaco• Tecnología probada con demostraciones de hasta 600 kWt• La temperatura de operación es compatible con algunas tecnologías de almacenamiento térmico• Facilidad para la hibridación	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Desarrollar y demostrar la tecnología CCUS para minimizar las emisiones de CO₂• Desarrollar sistemas de disociación de hidrógeno de bajo costo y eficaces para producir hidrógeno lo suficientemente puro para aplicaciones específicas• Mejorar el diseño y los materiales de los reactores para acomodar las reacciones altamente endotérmicas y los ciclos térmicos• Integrar el almacenamiento térmico para un funcionamiento continuo
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Elevadas emisiones de dióxido de carbono (requiere CCUS)	Características <ul style="list-style-type: none">• Insumos: Reformado de vapor - Agua, luz solar (concentrada para la energía térmica), gas natural• Subproductos: CO₂ (resultante de la etapa de purificación para aumentar la producción de hidrógeno)• Temperatura de operación: ~700 a 850°C

2.6 Producción de hidrógeno a partir de procesos fotoquímicos y fotocatalíticos

2.6.1 Separación fotocatalítica del agua

¿Qué es?

Utiliza materiales fotocatalizadores, normalmente en forma de partículas individuales o láminas nanoestructuradas, que utilizan la luz solar para separar el agua y producir hidrógeno y oxígeno gaseoso. Estos tipos de sistemas no tienen ningún cableado externo ni componentes adicionales.

¿Por qué es Importante?

No se requiere uso de membranas o entrada de electricidad para producir hidrógeno.

TRL: 1-3

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Técnicamente muy sencillo y, por lo tanto, de bajo costo para la operación• No requiere membrana (dependiendo de la configuración del sistema)• Bajo coste de capital en comparación con los métodos termoquímicos y fotobiológicos• Tamaño flexible del reactor• En algunos casos, podría utilizarse para el tratamiento simultáneo de aguas residuales	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Desarrollar materiales fotocatalizadores• Desarrollar materiales co-catalizadores (alternativas de menor costo)• Desarrollar fotocatalizadores para la excitación en un paso, el esquema en "Z" y la excitación en dos pasos• Mejorar los enfoques de ingeniería de superficie para la carga de co-catalizadores, el control de la morfología de la superficie, la modificación de la superficie y las estrategias de unión de fases de la superficie• Mejorar el diseño del sistema de producción de hidrógeno a gran escala, incluyendo el diseño del reactor y los esquemas de inmovilización de partículas
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Se necesita un esfuerzo adicional para separar el hidrógeno del oxígeno	Características <ul style="list-style-type: none">• Insumos: Agua (en algunos casos podría ser de baja pureza), luz solar• Subproductos: Oxígeno• Temperatura de operación: Ambiente

2.6.2 Separación fotoelectroquímica del agua

¿Qué es?

La luz solar irradia uno o más componentes fotovoltaicos que pueden generar electricidad. Uno o varios componentes fotovoltaicos pueden ser integrados con catalizadores para crear fotoelectrodos, o pueden conectarse eléctricamente a electrodos estándares recubiertos con catalizador. El hidrógeno y el oxígeno se producen en diferentes (foto)electrodos, separados por una membrana.

¿Por qué es Importante?

La separación fotoelectroquímica del agua utiliza la luz solar para convertir el agua en hidrógeno, con la opción de complementar el proceso con un poco de energía eléctrica.

TRL: 2-4

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Captura solar y producción de hidrógeno integradas• Utiliza la luz solar como fuente de energía primaria• En algunos diseños, se puede aplicar un aporte adicional de energía eléctrica• Separación de H₂ y O₂• Emisiones de carbono nulas o bajas• Puede aprovechar las tecnologías existentes de celdas solares y electrocatalizadores	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Continuar con el desarrollo de materiales• Desarrollar materiales catalizadores y cocatalizadores estables y de bajo costo• Desarrollar materiales fotoelectrodos de bajo costo y con alta eficiencia• Mejorar la estabilidad a largo plazo de los fotoelectrodos• Mejorar la integración y el diseño del sistema• Mejorar la durabilidad de la membrana y del electrodo• Realizar un análisis técnico-económico de los sistemas de hidrógeno solar basados en PEC vs a los sistemas de electrólisis fotovoltaicos
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Los fotoelectrodos absorben un rango limitado de luz solar	Características <ul style="list-style-type: none">• Entradas: Agua, luz solar, electricidad (opcional en algunos diseños)• Subproductos: Oxígeno

3 Lista de bienes y servicios asociados a las mejores tecnologías de acondicionamiento, almacenamiento, reelectrificación y distribución de hidrógeno

Un compresor de hidrógeno es un aparato que aumenta la presión del hidrógeno, normalmente mediante la reducción de una cámara que almacena temporalmente el hidrógeno (compresión mecánica). Hay varios tipos de compresores de hidrógeno y todos tienen el objetivo de aumentar la presión del hidrógeno. Esto puede lograrse por medios mecánicos, como las bombas de pistón o el uso de turbinas, por medios electroquímicos, como el bombeo de hidrógeno a través de una membrana con voltaje, o por medios químicos/térmicos, como la disolución de hidrógeno en un metal y su posterior calentamiento para liberar el hidrógeno a mayor presión.

3.1 Tecnologías de compresión del hidrógeno

3.1.1 Compresores mecánicos

¿Qué es?

Los compresores mecánicos se clasifican generalmente en dos grandes grupos: compresores de desplazamiento positivo y compresores dinámicos.

Compresores de desplazamiento positivo

Los compresores de desplazamiento positivo funcionan disminuyendo el volumen de un gas en una cavidad o espacio determinado. Las máquinas de desplazamiento positivo funcionan con una parte seleccionada del fluido a la vez. Su comportamiento mecánico y su velocidad de funcionamiento son diferentes a los de las máquinas dinámicas. Los compresores de desplazamiento positivo suelen incluir compresores alternativos (de simple efecto, de doble efecto, hiper), compresores rotativos (de tornillo, scroll, de paletas) y compresores de membrana. Los compresores alternativos se utilizan actualmente en la industria del hidrógeno.

Compresores dinámicos

Los compresores dinámicos funcionan aumentando continuamente el impulso de un gas a medida que éste fluye a través de ellos. Algunos ejemplos de compresores de este tipo son los compresores centrífugos (también llamados radiales), los compresores axiales y los compresores de flujo mixto. Los compresores centrífugos son más comunes en la industria para este tipo de máquinas.

El método más establecido para comprimir el hidrógeno es el uso de compresores de pistón alternativos. Un compresor de pistón típico es una unidad de una sola etapa accionada electrohidráulicamente, no lubricada y refrigerada con un líquido, que incluye un motor eléctrico, un depósito de aceite hidráulico, un intensificador de alta presión y un mecanismo de cambio del intensificador.

¿Por qué es Importante?

Los compresores de hidrógeno aumentan la densidad del hidrógeno, lo que permite almacenar una mayor cantidad de masa de hidrógeno en un volumen reducido, y se utilizan ampliamente para aplicaciones de proceso en refinerías, plantas petroquímicas y almacenamiento de energía.

TRL:6-8

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Tecnología madura• Adaptación a una amplia gama de caudales• Altas presiones de descarga• Todos los compresores provocan un aumento de la densidad del hidrógeno que permite almacenar una mayor masa de hidrógeno en un volumen reducido.• La tecnología de compresión mecánica está muy consolidada y son equipos de uso común en la industria del petróleo y el gas. Los compresores alternativos se utilizan para la compresión de hidrógeno a pequeña escala.	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Conceptos de sistemas potencialmente integrados, nuevos materiales o intercambiadores de calor• Reducción masiva de energía
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• En regímenes de baja y media presión, los compresores mecánicos pueden no ser muy eficientes• Cuando se requiere un compresor de menor tamaño, los mecánicos tienen la desventaja en comparación con otras alternativas (por ejemplo, electroquímicas y de hidruros metálicos)• Elevados costes de capital, de funcionamiento y de mantenimiento, debido a la presencia de un elevado número de engranajes y válvulas, y al vástago de conexión entre el pistón y el cigüeñal• Presencia de piezas móviles que presentan desgaste, ruido y alto consumo de energía• Es posible que no se produzca una alta pureza debido a una posible contaminación del fluido hidráulico	Características <ul style="list-style-type: none">• 1,0 kWh/kg H₂ para 1 a 20 bar teóricos - en la práctica, se requiere bastante más energía para la compresión mecánica, que va desde condiciones ambientales hasta 20bar.

3.1.2 Líquido iónico

¿Qué es?

Los compresores iónicos utilizan líquidos iónicos en lugar de un pistón para comprimir el hidrógeno gaseoso. Estos compresores se utilizan actualmente en varias estaciones de servicio de hidrógeno para alcanzar las presiones necesarias para los FCEV de hidrógeno.

¿Por qué es Importante?

Potencia de una compresión de menor costo. Al igual que otros compresores mecánicos, podría ser eficaz para la compresión de hidrógeno a gran escala.

TRL:9

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Potencial de ahorro energético del 40% respecto a los compresores mecánicos estándares• No requieren rodamientos ni sellos, que son las fuentes más comunes de fallos en los compresores mecánicos	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Desarrollar líquidos iónicos de bajo coste• Desarrollar líquidos iónicos de alto rendimiento (menor viscosidad, mejor rango de temperatura de operación)
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Baja densidad de energía volumétrica• Proceso intensivamente energético• Alto coste de los líquidos iónicos	Características <ul style="list-style-type: none">• Densidad gravimétrica del hidrógeno: N/A• Condiciones de almacenamiento: Hasta 1000 bar de presión demostrada

3.1.3 Electroquímica

¿Qué es?

Es un compresor en el que el hidrógeno se suministra en el ánodo y se conduce a través de una membrana de intercambio de polímeros hasta el cátodo, mediante la aplicación de una corriente eléctrica, y es retirado de forma comprimida en el otro lado.

¿Por qué es Importante?

La compresión electroquímica tiene el potencial de reemplazar la compresión mecánica al funcionar con mayores eficiencias (70-80%), con una huella más pequeña y la ventaja de no tener piezas móviles. Esto puede dar lugar a menores costes de mantenimiento, reducir los costos de las pilas y una operación sin ruido.

TRL:1-3

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Producto de hidrógeno fácilmente extraíble• Membrana en estado sólido• Sin piezas móviles: menos costes de mantenimiento y funcionamiento silencioso	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Mejorar la fiabilidad del compresor• Fabricar nuevas membranas• Reducir el arrastre electro-osmótico (EOD)• Mantener los sellos de las celdas a presiones de operación más altas
--	---

<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia que la compresión mecánica tradicional • Hasta ahora se han alcanzado presiones de salida de hidrógeno comprimido de aproximadamente 1000 bares con esta tecnología. • Puede funcionar a muy baja presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir los costes de las pilas
Limitaciones <ul style="list-style-type: none"> • Alto coste de capital • Vida útil y sensibilidad a las impurezas, como las especies de gases reactivos • La permeabilidad inversa hace que el gas hidrógeno vuelva al lado no presurizado del sistema 	Características <ul style="list-style-type: none"> • Densidad gravimétrica del hidrógeno: N/A • Condiciones de almacenamiento: Alta presión (hasta 1000 bar) • Eficiencia de la compresión: 70-80%

3.1.4 Recipientes presurizados de composición metálica

¿Qué es?

El hidrógeno se almacena a altas presiones (cercasas a los 800 bares) en tanques de acero o compuestos de fibra de carbono, mediante compresión mecánica.

¿Por qué es Importante?

Es una tecnología de almacenamiento bien establecida y comúnmente utilizada; actualmente es el método de almacenamiento estándar.

TRL: 9

Beneficios <ul style="list-style-type: none"> • Tecnología establecida • Proceso de compresión simple • Almacenamiento a temperatura ambiente 	Prioridades de I+D <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar tecnologías de compresión más eficientes
Limitaciones <ul style="list-style-type: none"> • Proceso intensivo energéticamente • Baja densidad volumétrica del hidrógeno 	Características <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de almacenamiento: Alta presión (350-800 bar), temperatura ambiente

3.1.5 Hidruros metálicos

¿Qué es?

El hidrógeno es absorbido por el material del hidruro metálico a bajas temperaturas, y posteriormente es liberado como gas altamente presurizado mediante la aplicación de calor.

¿Por qué es Importante?

Los compresores de hidruro metálico ofrecen la posibilidad de utilizar el calor residual en lugar de la electricidad para impulsar la compresión.

TRL:2

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Diseño y operación sencillo• Requiere un mantenimiento mínimo en operación• Posibilidad de utilizar el calor residual en lugar de la electricidad para impulsar la compresión	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Optimizar las aleaciones formadoras de hidruros• Permitir un funcionamiento fiable a largo plazo• Mejorar la cinética de absorción/liberación de hidrógeno con alta eficiencia• Mejorar la estabilidad a las impurezas del hidrógeno (por ejemplo, agua, CO₂)• Mejorar el diseño del sistema y la gestión térmica
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Requiere temperaturas elevadas para liberar el hidrógeno del material de hidruro metálico• Baja eficiencia• Alto coste de capital	Características <ul style="list-style-type: none">• Densidad gravimétrica del hidrógeno: N/A• Condiciones de almacenamiento: Alta presión (cercana a los 700 bares según la aplicación), almacenamiento a presión ambiente, se requieren altas temperaturas para liberar el hidrógeno

3.2 Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno

3.2.1 Almacenamiento físico

3.2.1.1 Estructuras metal-orgánicas (MOF)

¿Qué son?

La fisisorción de hidrógeno implica la adsorción física del hidrógeno en la superficie de una molécula o entre poros. Las estructuras orgánicas metálicas están compuestas por grupos de metales inorgánicos y enlaces orgánicos que actúan como redes de poros y canales altamente selectivos que proporcionan una gran superficie. La fisisorción es impulsada por las fuerzas que actúan entre las moléculas de hidrógeno y la superficie del material adsorbente.

¿Por qué es Importante?

La fisisorción es una forma ligera, segura y totalmente reversible para el almacenamiento y el transporte de hidrógeno.

TRL: 3-4

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiales ligeros • La liberación de hidrógeno es endotérmica, lo que anula el riesgo de ignición • El hidrógeno puede ser adsorbido y liberado rápidamente • Proceso totalmente reversible 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Demostrar prototipos de tanques que puedan funcionar en condiciones reducidas, pero no criogénicas. • Aumentar la energía de unión entre las moléculas de H₂ y los adsorbentes para aumentar la captación de hidrógeno • Investigar los efectos de los dopantes, los catalizadores y la sustitución para mejorar la captación de hidrógeno
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Requiere bajas temperatura o altas presiones • La débil interacción con el H₂ limita la aplicabilidad 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Densidad volumétrica del hidrógeno: ~40-50 kg H₂/m³ demostrada • Densidad gravimétrica del hidrógeno: varía mucho, ~2-20% en peso demostrado • Condiciones de operación: Temperaturas bajas (~-196°C)

3.2.2 Almacenamiento químico

3.2.2.1 Amoníaco

¿Qué es?

El amoníaco es sintetizado a partir del hidrogeno y el nitrógeno, mediante una variedad de métodos. Luego, el amoníaco puede ser transportado, y el hidrógeno puede ser nuevamente extraído al punto de uso mediante una descomposición termal y proceso de separación.

¿Por qué es Importante?

El amoníaco puede ser transportado en condiciones moderadas, y puede ser utilizado directamente o ser convertido de nuevo en hidrógeno para su uso.

TRL*:1-9

*Las diversas tecnologías de amoníaco en desarrollo cubren toda la escala TRL.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las fisuras provocan la formación de gas nitrógeno, que es inocuo y puede ser liberado a la atmósfera • Puede almacenarse a temperatura y presiones moderadas para su transporte • Puede aprovechar la infraestructura de gestión y transporte de amoníaco 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar métodos de síntesis con mayor eficacia y menor coste
---	---

<p>ya existente</p> <ul style="list-style-type: none"> Alta densidad gravimétrica de hidrógeno: 17,8% en masa Alta densidad volumétrica del hidrógeno -10,7kg H₂ / 100L a 10 bar y 25°C 	
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> Requiere fisuras en el punto de uso para extraer el hidrógeno Ver las limitaciones de cada método de síntesis Alta toxicidad de los vapores de amoníaco 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> Densidad volumétrica del hidrógeno: Alta (107 kg H₂/m³ a 10 bar y 25°C) Densidad gravimétrica del hidrógeno: Alta (17,8 % en masa) Condiciones de almacenamiento: Líquido a temperatura ambiente, 10-11 bar de presión Eficiencia energética: Varía en función del método de síntesis. Véase el método de síntesis Haber-Bosch para la síntesis convencional

3.2.2.2 Éter dimetílico (DME)

¿Qué es?

El DME es el más simple de los éteres y el producto de deshidratación del metanol. Es un gas a temperatura ambiente, tiene propiedades físicas muy similares al GLP y puede comprimirse fácilmente hasta convertirse en líquido. Al igual que el metanol, el DME renovable puede sintetizarse a partir del syngas derivado de una fuente renovable o mediante la hidrogenación directa del CO₂. Al igual que el metanol, el DME puede volver a convertirse en hidrógeno cuando sea necesario o utilizarse directamente en diversas aplicaciones. El DME puede sintetizarse directamente a partir del CO₂ para producirse a través del metanol. La síntesis directa del DME es más eficiente que la del metanol.

¿Por qué es importante?

El DME puede mezclarse con el GLP y utilizarse sin cambios en la infraestructura de almacenamiento y transporte, o en las tecnologías de uso final cuando se mezcla hasta un 10%. Con pequeñas modificaciones en las juntas estancaizantes y elastómeros, el DME puede sustituir completamente al GLP. El DME es un combustible más adecuado para los motores de encendido por compresión que el diésel, con un mayor índice de cetano y que produce muy pocas emisiones de partículas y de SOx en la combustión. Irónicamente, una importante iniciativa en Japón para desarrollar el DME como sustituto del diésel en la década de los 90 fue aparentemente detenida debido al "éxito" del filtro de partículas del gasóleo.

TRL*:3-6 y 8-9

*El TRL del DME depende de la materia prima empleada para su síntesis. Para el gas natural, el carbón o la biomasa, el TRL es muy alto (8-9), mientras que a partir del CO₂ es algo menor (5-6). La síntesis directa de DME a partir de CO₂ (no a través de metanol) es de nuevo más baja (3-4).

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Muy baja toxicidad• No contamina las aguas subterráneas ni el medio marino• Excelente combustible para motores CI o SI• Compatible con la infraestructura de almacenamiento y distribución de GLP existente• Mejor combustible químico/hidrocarburo intermedio que el metanol• Producción más eficiente que el metanol	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Desarrollar la síntesis directa a partir del CO₂:<ul style="list-style-type: none">▪ Desarrollo del proceso▪ Desarrollo de catalizadores▪ Desarrollo del reactor• Desarrollar un proceso de reformado para producir H₂ a partir de DME• Desarrollar el motor de encendido por compresión DME• Modificar el motor de encendido por compresión para utilizar el DME
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Tiene aproximadamente la mitad de la densidad energética del diésel• Los motores diésel requieren una modificación para su uso (no es un combustible de uso inmediato para los motores de combustión interna)• Se requieren pequeñas modificaciones para su uso en infraestructuras GLP si se utiliza en altas concentraciones	Características <ul style="list-style-type: none">• Densidad volumétrica del hidrógeno: ~95 kg H₂/m³ (Líquido a -25°C)• Densidad gravimétrica del hidrógeno: ~13% en masa• Condiciones de almacenamiento: Líquido a temperatura ambiente y 4 bares de presión.

3.2.2.3 Metilciclohexano (MCH)

¿Qué es?

El hidrógeno reacciona con el tolueno para formar metilciclohexano (MCH), un compuesto que puede transportarse a temperatura y presión ambiente. El hidrógeno puede extraerse después del transporte mediante la aplicación de calor o catálisis.

¿Por qué es Importante?

El tolueno hidrogenado puede transportar hidrógeno en forma líquida a temperatura y presión ambiente.

TRL:7

Beneficios <ul style="list-style-type: none">• Se mantiene en estado líquido a temperatura y presión ambiente• Menor pérdida durante el almacenamiento y el transporte a largo plazo• Puede utilizar la infraestructura petrolera y química existente para el almacenamiento y el transporte	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none">• Reducir la temperatura y la presión de hidrogenación y deshidrogenación• Desarrollar catalizadores con elementos baratos y de mayor eficacia
Limitaciones <ul style="list-style-type: none">• Tanto el tolueno como el MCH son sustancias tóxicas• Requiere purificación• Necesidad de devolver el medio de transporte si es exportado• Requiere altas temperaturas, tanto para la hidrogenación como para la deshidrogenación	Características <ul style="list-style-type: none">• Densidad volumétrica del hidrógeno: 47 kg H₂/m³• Densidad gravimétrica del hidrógeno: 6,1 % en masa• Condiciones de almacenamiento: Almacenamiento a temperatura ambiente, debe mantenerse por debajo de 30°C. El contenedor debe ser cuidadosamente sellado para evitar la exposición a la luz solar, el calor y la humedad• Eficiencia energética de ida y vuelta: <50%.

3.2.2.4 Hidruros metálicos

¿Qué es?

Los metales como el magnesio se enlazan químicamente con el hidrógeno gaseoso para ser transportado como un hidruro metálico. Cuando se necesita el hidrógeno, se aplica calor para liberarlo del metal. Los hidruros intermetálicos son una variante en la que los metales de transición están presentes en lugar de los metales del grupo principal.

¿Por qué es importante?

Los hidruros metálicos ofrecen un almacenamiento a presión moderada, una recuperación del hidrógeno a temperaturas seguras y una densidad de almacenamiento superior a la del hidrógeno presurizado o licuado.

TRL*: 5-8

*Los hidruros de muy alta capacidad de almacenamiento de hidrógeno (por ejemplo, el hidruro de aluminio, AlH₃) son de baja TRL ya que no son reversibles para el almacenamiento de hidrógeno. Los hidruros a temperatura ambiente con menor capacidad de almacenamiento de hidrógeno (< 2 wt% H₂) son de alta TRL.

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • La liberación de hidrógeno es endotérmica y autorregulada, lo que reduce el riesgo de explosiones accidentales • Presiones más bajas que el gas presurizado y temperaturas más moderadas que el hidrógeno licuado, aumentando su seguridad • Mayor densidad de almacenamiento que el hidrógeno presurizado o licuado • Los hidruros de baja temperatura tienen una presión y temperatura de funcionamiento cercanas al ambiente • Para los hidruros a temperatura ambiente, su vida útil extremadamente larga, de hasta 20.000 ciclos en algunos casos • Autodescarga insignificante • 90% de eficiencia de ida y vuelta para los hidruros a temperatura ambiente • Puede ampliarse fácilmente a capacidades muy grandes para el almacenamiento en red • Adecuado para el transporte de hidrógeno a las estaciones de servicio 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para los hidruros de alta temperatura, mejorar la cinética de sorción de hidrógeno para una disociación rápida y eficaz de las moléculas de hidrógeno • Mejorar la densidad de energía, la duración del ciclo y la temperatura de operación • Mejorar la densidad gravimétrica del hidrógeno
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • En el caso de los hidruros de alta temperatura, la hidrogenación y la liberación de hidrógeno se producen a temperaturas elevadas, que oscilan entre ~100 y 500°C. Los hidruros simples de metales ligeros requieren altas temperaturas para una rápida liberación de hidrógeno • Los hidruros de alta temperatura requieren temperaturas de operación más mayores y no son reversibles en algunos casos • Los hidruros metálicos a baja temperatura no son reversibles en algunos casos • Baja densidad gravimétrica de hidrógeno 	<p>Características - hidruros de alta temperatura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Densidad volumétrica del hidrógeno: >100 kg H₂/m³ • Densidad gravimétrica del hidrógeno: Moderada a alta (7 a 10 % en masa) • Condiciones de hidrogenación y extracción: ~100 a 500°C, o más para lograr la reversibilidad del hidrógeno • Condiciones de almacenamiento: La reversibilidad en algunos casos se produce sólo en condiciones de alta temperatura y presión. Por ejemplo, Mg/MgH₂ es 20 bar y 300°C, pero AlH₃ es >100 C y > 1000 bar de presión H₂ • Eficiencia energética de la hidrogenación/deshidrogenación: 80%.

<p>para la generación actual de hidruros metálicos de baja temperatura. Muchos intermetálicos con una termodinámica favorable tienen una baja capacidad gravimétrica y/o una escasa capacidad de ciclado</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensible al aire y a la humedad 	<p>Características - hidruros de baja temperatura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Densidad volumétrica del hidrógeno: >100 kg H/m³ • Densidad gravimétrica del hidrógeno: Baja (< 2 % en masa) • Condiciones de hidrogenación y extracción: -10 a 50°C • Condiciones de almacenamiento: Reversible a temperatura ambiente y en condiciones razonables de presión de hidrógeno (por ejemplo, TiFe y LaNi₅ pueden absorber hidrógeno a 30 bares y 25°C) • Eficiencia energética de la hidrogenación/deshidrogenación: 90%.
--	---

3.2.3 Hidrógeno líquido

3.2.3.1 Criocompresión

¿Qué es?

El hidrógeno se enfría a temperaturas criogénicas y se comprime a presiones cercanas a los 300 bares en un fluido supercrítico. El hidrógeno crio-comprimido puede ser comprimido a presiones de hasta 700 bares.

¿Por qué es importante?

Es más viable desde el punto de vista económico cuando se requiere un almacenamiento de hidrógeno de alta densidad en un espacio limitado, o cuando se trata de largas distancias de ida y vuelta.

TRL: 5-6

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mayor capacidad de almacenamiento volumétrico que el gas comprimido • Menos pérdidas por evaporación (pérdidas por ebullición) que en los mecanismos típicos de compresión o en el hidrógeno líquido • LA criocompresión puede ser más densa que el hidrógeno líquido: el hidrógeno crio-comprimido puede estar en estado líquido o gaseoso. • La latencia se prolonga en gran medida a medida que aumenta la presión admisible 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reducir los índices de ebullición (es decir, de vaporización) • Mejorar la ingeniería, el aislamiento, los intercambiadores de calor y los refrigerantes • Crear tanques de almacenamiento más grandes y mejor aislados • Aumentar el tiempo de latencia sin pérdidas (tiempo antes que el hidrógeno tenga que ser ventilado del tanque) • Reducir los costes de material y mejorar la
---	---

en el interior del recipiente	durabilidad para aumentar la vida útil
Limitaciones <ul style="list-style-type: none"> • Requiere material de almacenamiento avanzado y de mayor costo 	Características <ul style="list-style-type: none"> • Densidad volumétrica del hidrógeno: 49,6 kg H₂/m³ a 700 bar, 50,9 kg H₂/m³ a 350 bar • Densidad gravimétrica del hidrógeno: 7,0% a 700 bar, 10,0% a 350 bar • Condiciones de almacenamiento: Comúnmente 250 a 350 bar, 23 a 35K. También se registran 78K a 700 bar, 66K a 350 bar • Rango de eficiencia del pozo al tanque: 40-45%. La energía necesaria para licuar el hidrógeno es de 6 a 8 kW/kg de H₂. • La eficiencia del pozo al tanque incluye desde el gas natural consumido hasta el bajo poder calorífico del H₂ entregado al tanque.

3.2.3.2 Tanques criogénicos

¿Qué es?

El hidrógeno se licúa y se almacena a -253°C, a presiones ambientales moderadas, en tanques criogénicos mediante un proceso de compresión y enfriamiento de varias etapas.

¿Por qué es importante?

Es más viable desde el punto de vista económico cuando se requiere un almacenamiento de hidrógeno de alta densidad en un espacio limitado, o cuando se trata de una larga distancia de ida y vuelta.

TRL: 9

Beneficios <ul style="list-style-type: none"> • Mayor capacidad de almacenamiento volumétrico que el gas comprimido • Menores pérdidas por evaporación que los mecanismos típicos de compresión 	Prioridades de I+D+i <ul style="list-style-type: none"> • Reducir los índices de ebullición (es decir, de vaporización) • Mejorar la ingeniería, el aislamiento, los intercambiadores de calor y los refrigerantes • Mejorar las técnicas de construcción de materiales aislantes para conseguir depósitos de mayor tamaño y mejor aislados • Mejorar la tecnología de compresión de hidrógeno • Estudiar y analizar los efectos de los diseños de la forma del recipiente, la estratificación y el sobrellenado térmico
--	--

	<ul style="list-style-type: none"> • Llevar a cabo un análisis térmico-dinámico de los efectos del flashing durante el transporte de hidrógeno líquido desde el almacenamiento a granel hasta el almacenamiento atmosférico in situ • Desarrollar catalizadores de bajo coste para mejorar la conversión de orto-para, y la capacidad de medición de la proporción de orto-para, para reducir la tasa de ebullición • Realizar estudios de congelación de impurezas en la producción de H₂
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Requiere material de almacenamiento avanzado y de mayor costo • La licuefacción requiere una planta técnica compleja • El hidrógeno licuado tiene pérdidas por ebullición • Para licuar el hidrógeno se necesita hasta un 40% de su contenido energético 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Densidad volumétrica del hidrógeno: kg 70.85H₂/m³ a 1 bar • Condiciones de almacenamiento: 2- 10 bar, 20K • Rango de eficiencia del pozo al tanque: 20-25%. La energía necesaria para licuar el hidrógeno es de 6- 8 kW/kg H₂. • La eficiencia del pozo al tanque incluye el proceso desde el gas natural consumido hasta el bajo poder calorífico del H₂ entregado al tanque.

3.3 Tecnologías de distribución - transporte de hidrógeno

En la presente sección se presentan las principales tecnologías de distribución y transporte de hidrógeno, principalmente entre equipos necesarios para su producción, acondicionamiento y almacenamiento. Las tecnologías y equipos necesarios para su transporte mayor no son abordadas en profundidad en el presente reporte.

3.3.1 Transporte por tuberías

¿Qué es?

El hidrógeno se transporta por tuberías desde 193. La distribución de hidrógeno por tuberías se usa principalmente cuando el hidrógeno se produce en grandes instalaciones industriales a partir de combustibles fósiles, por ejemplo, mediante el reformado de vapor del gas natural. La instalación de tuberías de hidrógeno requiere un coste de capital muy elevado. Es por ello, que se ha demostrado que esta solución sólo es adecuada para distancias pequeñas y medianas. Además, la distribución de hidrógeno a través de tuberías es sin duda menos eficiente que la distribución de metano. Para compensar las pérdidas de presión, el gas distribuido por las tuberías debe comprimirse a intervalos regulares. De esta manera, la energía necesaria para comprimir el gas depende únicamente de su volumen y de la presión que se quiera alcanzar. Sin embargo, la energía

recuperada durante el uso posterior del gas es diferente. En efecto, 1 m³ de metano tiene un contenido energético de 9,89 kWh, mientras que el mismo volumen de hidrógeno tiene 3 kWh. Esto significa que la energía que hay que gastar en la distribución de hidrógeno a través de las tuberías es tres veces superior a la del metano, para una cantidad deseada de energía recuperada.

¿Por qué es Importante?

El hidrógeno de alta pureza se transporta desde hace mucho tiempo. El desarrollo de sus aplicaciones, como los vehículos con celdas de combustible, ha servido para estimular la innovación que busquen superar los obstáculos percibidos. La transición a una economía basada en el hidrógeno requerirá el transporte a granel: esto no está exento de dificultades, pero ninguna de ellas parece insuperable, y puede aprovechar significativamente las costumbres y las prácticas de las industrias del gas natural.

TRL: 6-9

<p>Beneficios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los oleoductos son potencialmente los más baratos para el transporte masivo a largas distancias. • Hasta la fecha, se utilizan unos 4.500 km de tuberías para distribuir hidrógeno en todo el mundo, la mitad de ellos en Estados Unidos. 	<p>Prioridades de I+D+i</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reducir los costos del material de contenido energético y mejorar la durabilidad para aumentar la vida útil • Compensar las pérdidas de presión
<p>Limitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presión limitada a <70bar • Pérdidas potenciales elevadas • Se requieren aceros y revestimientos especiales • Alto coste de instalación 	<p>Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los oleoductos de hidrógeno dedicados son bien conocidos en Estados Unidos (>2000km) y en la UE (>250km).

3.4 Otras tecnologías de transporte de hidrógeno

Dependiendo de la tecnología de repostaje, el hidrógeno puede llegar a la estación de servicio en forma gaseosa o líquida. Para el uso comercial, se está considerando el suministro por camiones (*tube trailers*) (de hidrógeno gaseoso comprimido (CGH₂) o de hidrógeno líquido (LH₂)) o por tuberías (CGH₂). Además, es posible generar el hidrógeno in situ con electrólisis, lo que da lugar a unos cientos de Nm³ h⁻¹ de hidrógeno. También se consideran otras opciones de suministro, como los portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHC). El hidrógeno comprimido puede transportarse en camiones en cilindros o tubos de gas con presiones de entre 200 y 500 bares. Normalmente, se agrupan varios cilindros o tubos a módulos en un contenedor de 20' o 40' que se monta en un camión (*tube trailer*). En la actualidad, el suministro de hidrógeno gaseoso a través de tuberías el proceso utiliza la infraestructura existente de gasoductos de gas natural para transportar el futuro hidrógeno por toda Europa (*European Hydrogen Backbone*). Para garantizar que la calidad del hidrógeno sea suficiente para la movilidad, es probable que se requiera un purificador de hidrógeno en los lugares de extracción (por ejemplo, la estación de reabastecimiento de hidrógeno).

3.5 Tecnologías de reelectrificación del hidrógeno

Las tecnologías de reelectrificación del hidrógeno son, en su mayoría, consideradas como parte de eslabones finales de la cadena de valor del hidrógeno. A continuación, se presentan las principales tecnologías de reelectrificación y sus características.

3.5.1 Pilas de Combustible

El hidrógeno puede ser re-electrificado, es decir, generar electricidad mediante pilas de combustibles posterior a su producción y almacenamiento. Una pila de combustible es un dispositivo que usa principalmente la energía química del hidrógeno en combinación con oxígeno para producir electricidad, calor y agua mediante una reacción electroquímica. En comparación con las tecnologías basadas en la combustión, como los sistemas Otto y Diesel, las pilas de combustibles tienen distintos beneficios, como la capacidad de producir electricidad sin generar contaminantes atmosféricos, como el dióxido de carbono (CO₂), y son insonoros. Además, tienen mayor eficiencia al operar con una mayor eficiencia termodinámica, llegando a tener eficiencias prácticas entre el 50~60%. Por lo tanto, tienen una gran variedad de aplicaciones en diversos sectores, como transporte, industrial, comercial, residencial, entre otros. Asimismo, tienen el potencial de reemplazar a los motores de combustión interna en automóviles, autobuses, camiones y en el transporte marino.

Una pila de combustible típica está compuesta por un electrolito y dos electrodos. Las moléculas de oxígeno entran a través del cátodo y las del hidrógeno a través del ánodo, donde es dividida en electrones y protones por un catalizador. Los electrones pasan por un circuito externo para generar la energía requerida y el ion hidrógeno pasa a través del electrolito hacia el cátodo, donde se une al oxígeno para formar agua.

Los tipos de pilas de combustible se diferencian principalmente por los electrolitos utilizados, la temperatura de operación y la construcción de los electrodos. Esto les entrega distintas prestaciones siendo la más adecuada para distintas aplicaciones fijas y móviles. En la actualidad, las principales tecnologías conocidas son las de ácido fosfórico (PAFCs), las de membrana de intercambio protónico (PEM), las de carbono fundido (MCFCs), las de óxido sólido (SOFCs) y las alcalinas, las cuales son detalladas a continuación.

Ácido Fosfórico (PAFCs)

Las pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC), utilizan electrodos de papel carbón, catalizadores de platino y un electrolito líquido de ácido fosfórico (H₃PO₄). La solución de H₃PO₄ es un líquido transparente e incoloro utilizado en fertilizantes, detergentes, saborizantes para alimentos y productos farmacéuticos. La conductividad iónica del ácido fosfórico es baja en temperaturas reducidas entre 150 y 200°C.

Los PAFC son más tolerantes a las impurezas en los combustibles fósiles que se han reformado en hidrógeno que las celdas PEM, que se "envenenan" fácilmente con el monóxido de carbono porque el monóxido de carbono se une al catalizador de platino en el ánodo, disminuyendo la eficiencia de la celda de combustible. Los PAFC tienen una eficiencia superior al 85% cuando se utilizan para la cogeneración de electricidad y calor, pero son menos eficientes para generar electricidad por sí solos (37% -42%).

Los PAFC también son menos potentes que otras pilas de combustible, dado el mismo peso y volumen. Como resultado, estas pilas de combustible suelen ser grandes y pesadas. Los PAFC también son caros. Requieren cantidades mucho más altas del costoso catalizador de platino que otros tipos de pilas de combustible.

Las PAFC se considera la "primera generación" de pilas de combustible modernas. Es uno de los tipos de células más maduros y el primero en ser utilizado comercialmente. Este tipo de pila de combustible se utiliza normalmente para la generación de energía estacionaria, pero algunos PAFC se han utilizado para propulsar vehículos grandes como los autobuses urbanos.

Membrana de Intercambio Protónico (PEM FC)

Las celdas de combustible de membrana de electrolito de polímero (PEM), brindan una alta densidad de potencia y ofrecen las ventajas de bajo peso y volumen en comparación con otras celdas de combustible. Las pilas de combustible PEM utilizan un polímero sólido como electrolito y electrodos de carbono poroso que contienen platino o un catalizador de aleación de platino. Solo necesitan hidrógeno, oxígeno del aire y agua para funcionar. Por lo general, se alimentan con hidrógeno puro.

Las pilas de combustible PEM funcionan a temperaturas relativamente bajas, entre 30 °C y 120 °C. La operación a baja temperatura les permite comenzar rápidamente (menos tiempo de calentamiento) y da como resultado un menor desgaste de los componentes del sistema, lo que resulta en una mayor durabilidad. Sin embargo, requiere que se use un catalizador de metal noble, generalmente platino, para separar los electrones y protones del hidrógeno, lo que aumenta significativamente el costo del sistema. El catalizador de platino también es extremadamente sensible al envenenamiento por monóxido de carbono, por lo que es necesario emplear un reactor adicional para reducir el monóxido de carbono en el gas combustible si el hidrógeno se deriva de un combustible hidrocarbonado. Evidentemente la reacción anterior implica costos adicionales

Desde el punto de vista de eficiencia, a mayor temperatura de operación, la eficiencia aumenta significativamente. Esto se debe a la mayor velocidad de reacción. Sin embargo, con una temperatura de trabajo superior a 100°C, el agua se puede evaporar, deshidratando a la membrana, la cual permite la reducción en la conductividad protónica. La eficiencia eléctrica de estas celdas de combustible se encuentra entre 40 y 60%, y la potencia de salida de hasta 100kW.

Los sistemas PEMFC, suelen utilizarse en aplicaciones portátiles y estacionarias. Sin embargo, entre sus aplicaciones, el transporte, parece ser el más apropiado, ya que proporciona un suministro continuo de energía eléctrica con altos niveles de eficiencia y densidad de potencia. Requieren un mínimo de mantenimiento, debido a que no hay partes móviles en el apilamiento de la celda. Los vehículos que funcionan a partir de celdas de combustible (FCV), son la aplicación más prometedora de los sistemas PEMFC.

Alcalinas (AFC)

La celda AFC genera energía eléctrica por medio de un electrolito alcalino de hidróxido de potasio (KOH) en solución base agua. Generalmente, la temperatura de funcionamiento de las celdas AFC, se encuentra en el rango de 60 a 90 °C. Las AFC se consideran celdas de combustible de baja temperatura con un costo de catálisis relativamente menor. El catalizador más común utilizado para acelerar las reacciones electroquímicas en el cátodo y ánodo en este tipo de celda de combustible es el níquel. La eficiencia eléctrica de la AFC es de aproximadamente 60% y de más de 80% de eficiencia con cogenerador

Debido a su costo, las celdas AFC, se consideran las más económicas, ya que el electrolito que utilizan es hidróxido de potasio (KOH), el cual es un químico estandarizado. El catalizador para los electrodos es de níquel que no es costoso en comparación con otros tipos de catalizadores como son los metales nobles. Debido a la eliminación de placas bipolares, las celdas AFC, tienen estructuras simples. A pesar de todas estas ventajas, las celdas AFC, sufren fácilmente de envenenamiento de dióxido de carbono.

Carbono Fundido (MCFCs)

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC), son celdas de alta temperatura. Utilizan como electrolito una mezcla de sales de carbonatos fundidos, suspendidos en una matriz cerámica porosa e inerte químicamente (Ovshinsky et al., 2006). En una MCFC, la reacción en el ánodo se produce entre el combustible (hidrógeno) y los iones de carbonato, que reaccionan para formar dióxido de carbono, agua y electrones. En el ánodo, el gas de alimentación (generalmente metano CH₄) y el agua H₂O, se convierten en hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂).

Actualmente, las celdas MCFC, son empleadas en diversas aplicaciones como centrales eléctricas de servicio público, industria y servicios militares. Las ventajas y desventajas de las celdas MCFC, están estrechamente relacionadas con su alta temperatura de funcionamiento. Estas celdas, pueden ser alimentadas directamente con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural y propano. No requieren catalizadores de metales nobles para la oxidación y reducción electroquímica. Asimismo, no requieren de ningún desarrollo de infraestructura para su instalación, sin embargo, se requiere mucho tiempo para obtener la temperatura de funcionamiento adecuada y generación de energía.

La eficiencia mejorada es otra razón por la que los MCFC ofrecen reducciones de costos significativas en comparación con las celdas de combustible de ácido fosfórico. Las pilas de combustible de carbonato fundido, cuando se combinan con una turbina, pueden alcanzar eficiencias cercanas al 65%. Cuando se captura y utiliza el calor residual, la eficiencia general del combustible puede ser superior al 85%.

Óxido Sólido (SOFCs)

Las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), son celdas de alta temperatura conformadas de un electrolito cerámico sólido. Generalmente, las celdas SOFC, utilizan una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono formado internamente por el reformado del hidrocarburo como combustible, además del aire como oxidante (Mark, 2003). El oxígeno se reduce en la reacción de reducción del cátodo a 1000°C, mientras que la oxidación del combustible sucede en el ánodo. El ánodo debe ser poroso para conducir combustible y transportar los productos de la oxidación lejos del electrolito y de la interfase electrodo-combustible.

El calor generado como subproducto, generalmente, se utiliza para generar más electricidad, haciendo girar turbinas de gas y, por lo tanto, la eficiencia con cogeneración aumenta entre 70 y 80%. Los sistemas SOFC, son fiables, modulares y adaptables a varios combustibles con bajas emisiones de gases nocivos tales como NO_x y SO_x.

Se pueden considerar como sistemas locales de generación de energía para zonas rurales que no tienen acceso a las redes públicas. Además, son de funcionamiento silencioso y mantenimiento de bajo costo. Por otro lado, el largo tiempo requerido para iniciar su operación y de enfriamiento, así como diversos problemas de compatibilidad química y mecánica de sus componentes, limita el uso de este tipo de celdas.

Tabla 1 Características de las celdas de combustible [1]

Tipo de pila	Ventajas y desventajas	Usos	Temperatura de Operación (°C)	Potencia de salida	Eficiencia eléctrica (%)
PEMFC	+Baja temperatura de operación bajo nivel de ruido +Alta densidad energética +Rápida puesta en marcha +Tamaño pequeño -Catalizador costoso -Sensible a impurezas	Transporte Distribución de energía	<120	1-100kW	<60
AFC	+Baja temperatura de operación +Rápida puesta en marcha +Bajo costo en componentes -Sensible al CO2 en aire y combustible	Misiones espaciales y/o militares Transporte	<100	1-100 KW	<60
SOFC	+Alta eficiencia +Flexible al uso de combustibles +Adecuado para CHP -Altas temperaturas de operación -Sensible a corrosión -Alto tiempo de puesto en marcha -Limitado uso de apagones	Potencia auxiliar. Alta distribución de energía	500-1000	1kW-2MW	<60
PAFC	+Alta tolerancia a impurezas del combustible +Adecuado para CHP -Susceptible a sulfuración -Alto tiempo de puesto en marcha -Catalizador de alto costo	Distribución de energía	150-200	50kW-1MW	<40
MCFC	+Alta eficiencia +Adecuado para CHP +Flexible al uso de combustibles -Altas temperaturas de operación -Baja durabilidad -Susceptible a la corrosión -Alto tiempo de puesta en marcha -Baja densidad energética	Sistema auxiliar en automóviles Generación de electricidad y calor	600-700	300kW-3MW	<50

3.5.2 Combustión en Turbinas de Gas

La re-electrificación del hidrógeno es posible mediante pilas de combustible (transformación química) o mediante combustión (transformación térmica).

La re-electrificación térmica del hidrógeno se puede realizar en turbinas de gas o en motores reciprocantes. En ambos casos, se busca la combustión controlada de una mezcla de hidrógeno/aire, para producir finalmente un torque sobre el eje principal del mecanismo, que se logra transformar en electricidad acoplando éste a un generador. La combustión de hidrógeno/aire presenta diversos desafíos que a la fecha siguen vigentes. Los principales desafíos son:

- Autoignición: ignición de la mezcla antes de lo requerido.
- Flashback: retroceso del frente de combustión hacia lugares no deseados.
- Inestabilidades termoacústicas.
- Mayores emisiones NO_x

Además de los desafíos técnicos existe el desafío del suministro del hidrógeno, el cual debiera ser alrededor de 3 veces el volumen de metano para lograr una producción de electricidad equivalente usando turbinas a gas.

Existe una transición hacia el uso exclusivo de hidrógeno, en la cual se combustiona una mezcla con combustible fósil (usualmente gas natural) en distintas proporciones (hasta 60% de hidrógeno actualmente). Esto ayuda, en parte, a resolver los desafíos de la combustión exclusiva de hidrógeno, a la vez que disminuye las emisiones respecto a la combustión exclusiva de fósiles (considerando hidrógeno de bajas emisiones). Se espera que al 2030 los desafíos técnicos de la combustión de hidrógeno en turbinas hayan sido resueltos, de tal manera poder combustionar exclusivamente hidrógeno/aire.

Por otra parte, esta tecnología tiene el beneficio de poder configurarse para operar con nuevos combustibles, incluyendo aquellos con mayor proporción de hidrógeno. Además, tiene la posibilidad de utilizar infraestructura ya existente, como las infraestructuras de gas natural. Asimismo, pueden operar a mayores eficiencias que las plantas de carbón, con menos emisiones de CO₂ que funcionen en conjunto a diferentes métodos CCS para asegurar la descarbonización, y puede ser aplicable para la producción de energía a gran escala.

**Como Agencia Nacional de Ciencia
y Catalizador de la Innovación de
Australia, CSIRO resuelve los
mayores desafíos mediante
ciencia y tecnología innovadoras.**

CSIRO. Desbloqueando un mejor
futuro para todos.

Contáctanos

1300 363 400
+61 3 9545 2176
csiro.au/contact
csiro.au

Para más Información

Energía
Dr Nawshad Haque
+61 3 95458931
Nawshad.Haque@csiro.au
csiro.au/energy