

VECTOR ENERGÉTICO: HIDRÓGENO MULTICOLOR (CON ELECTROQUÍMICA)

ENERGY VECTOR: MULTICOLORED HYDROGEN (WITH ELECTROCHEMISTRY)

Olga P Márquez¹, Keyla Márquez², Elkis Weinhold¹, Jairo Márquez¹

¹Universidad de Los Andes (ULA), Facultad de Ciencias Laboratorio de Electroquímica.

Mérida 5101-Venezuela. ²Universidad de Los Andes (ULA), Facultad de Ingeniería
Núcleo Universitario Alberto Adriani. El Vigía-Mérida- 5101- Venezuela

Email: jokkmarquez82@gmail.com.

Recibido: 03-02-2023

Aceptado: 20-04-2023

Resumen

El planeta requiere en la actualidad de un equilibrio entre las emisiones y el consumo de gases de efecto invernadero y de contaminantes del ambiente en general. El hidrógeno es el material base más cuantioso en el universo, obtenible en nuestro planeta por diversas vías, es vector energético no contaminante. La energía química contenida en el hidrógeno puede convertirse en calor, energía cinética y electricidad. Es posible también, su transformación en otros vectores energéticos tales como, amoníaco, metanol, metano sintético, y otros combustibles sintéticos (e-fuels). Se considera actualmente una fuente energética no contaminante, segura, fiable, inagotable, y conjuntamente con el sol, constituyen un binomio fundamental en lo práctico y económico. La diversidad de formas de preparación del vector hidrógeno, incluye también formas muy contaminantes de síntesis, que deben ser evitadas y en ese sentido, presentamos acá componentes del ahora denominado hidrógeno multicolor debido a diferentes grados de contaminación según la ruta de síntesis. Los puntos tratados, resultados y consideraciones presentadas se basan en estudios y aplicaciones electroquímicas realizadas en la comunidad científica.

Palabras clave: Hidrógeno, Amoníaco verde, vector energético, energía limpia

Abstract

The planet requires an equilibrium between emissions and consumption of greenhouse gases and environment contaminants in general. Hydrogen is the most abundant based material in Universe, obtained in our planet by different routes, it is a no contaminant energetic vector. Chemical energy in hydrogen can be converted in heat, kinetic energy and electricity. Also, its conversion is possible to other energetic vectors as ammonia, methanol, synthetic methane and e-fuels. Hydrogen is considered a non-contaminant source, secure, reliable, inexhaustible, and, in conjunction with the sun, conform a practical and economical fundamental binomial. Some of the diversity of hydrogen preparation forms are very contaminants and they have to be avoided, and in relation with that, now is being known the multicolor hydrogen according with the contamination grade of its synthesis route. Results and details of the presentation are based in performed electrochemical studies and applications in the scientific community.

Key words: Hydrogen, green ammonia, energy vector, clean energy

Jairo Márquez P: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciado en Química (UCV-ULA), personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. Mérida-Venezuela. Email: jokkmarquez82@gmail.com.

Olga P. Márquez: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciada en Química (UCV-ULA), personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. Mérida-Venezuela. Email: olgamq@gmail.com. **Elkis Weinhold:** Dra en Química Aplicada, Electroquímica (ULA), Licenciada en Química (ULA), personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA Mérida-Venezuela. Email: elkisweinhold@gmail.com. **Keyla Márquez:** Msc. en Electroquímica Fundamental y Aplicada (ULA), Ing. Industrial (IUPSM), personal docente y de investigación de la Universidad de Los Andes Núcleo Universitario Alberto Adriani. El Vigía estado Mérida, Venezuela Email: keylaenator@gmail.com

1. Introducción

La crisis ambiental que vivimos, caracterizada por su contaminación, efecto invernadero, cambio climático y lluvia ácida, entre otros factores¹⁻³, ha requerido de una inmediata atención, planificación, ejecución y aplicación de programas, proyectos, investigaciones, medidas y acciones, que contribuyan con la mitigación, el control, el saneamiento y restablecimiento de sanas y seguras condiciones ambientales, para la vida en el planeta.

Desde el punto de vista energético, son múltiples y variadas las fuentes y los factores contaminantes, y se considera como punto inicial de urgente tratamiento, el proceder a la descarbonización ambiental y protección de la capa de ozono (algunos países ya con resultados). Con relación a ello, se plantea la necesidad actual de la reducción de contaminantes tales como CO₂, CO, SO₂, NO_x y CClFC (compuestos cloro-fluoro-carbonados). Se desarrollan trabajos con fuentes energéticas renovables y procesos químicos no contaminantes, con tal finalidad⁴.

La fuente primaria, infinita, fundamental, lo constituye el centro de nuestro sistema solar, "EL SOL" y energías también primarias que derivan de él (eólica, hidráulica, marina, biomasa, gas natural), así, como energías secundarias (eléctrica, calórica, química (compuestos simples)).

El hidrógeno⁵⁻⁹ es también el principal componente estelar; es una fuente secundaria de energía en nuestro planeta. Se presenta como una manera adecuada de almacenar energía, en forma de energía química. El hidrógeno es obtenido por consumo de fuentes primarias de energía, renovables y no renovables, de fuentes secundarias y a partir de ciertas materias primas como el agua, la biomasa, gas natural, etc. El hidrógeno es obtenible, a partir de la energía solar directa, con la utilización de energía térmica solar, energía solar fotovoltaica, procesos fotolíticos, procesos fotoelectroquímicos, y se amplía su síntesis con la incorporación de la nanocatálisis y nanociencia.

En la actualidad se tiene ya, una clasificación de hidrógeno multicolor, dependiendo de su grado de contaminación en el proceso de síntesis (no contaminante, poco contaminante, contaminante)^{10,11}. En este trabajo presentamos vías de síntesis de hidrógeno no contaminante y poco contaminante, toda vez, que el combustible hidrógeno juega un papel estelar en esta búsqueda de fuentes energéticas seguras, fiables, inagotables, no contaminantes o muy poco contaminantes. Se combinan fuentes primarias y secundarias de suministro de energía, con técnicas y procesos electroquímicos ya existentes, con esta finalidad.

2 . Vector Hidrógeno

Las diferentes vías de obtención del hidrógeno ofrecen seguridad de abastecimiento y acceso a la energía. El uso de energías renovables y sistemas electroquímicos en su producción, sumados a los avances en su almacenamiento y transporte, estimulan su estudio, aplicabilidad, desarrollos comunitarios, industriales y económicos. Adicionalmente se presenta como fuente energética no contaminante, accesible y con amplia y variada utilidad. La relación que existe entre el proceso de síntesis del hidrógeno y la producción simultánea de agentes contaminantes ambientales, ha dado origen al hidrógeno multicolor como se muestra en la figura 1.

La descarbonización es el proceso de reducción de las emisiones de carbono a la atmósfera. Se busca lograr un ambiente sano, descontaminado, con neutralidad climática y suministros variados y abundantes. La descarbonización contribuye al logro de estas condiciones de vida.

Contribución con la descarbonización:

- ⊗Aumento en el uso de energías renovables
- ⊗Aumento en la producción de electricidad renovable
- ⊗Reducción de la dependencia energética
- ⊗Reducción en las emisiones de CO₂
- ⊗Reformas Industriales, en procesos, en servicios, en acciones.



Figura 1. Hidrógeno multicolor. Síntesis de baja contaminación

⊙H₂ Verde: Se genera a partir del agua haciendo uso de la electricidad producida por energías renovables. No hay emisión de CO₂ y se asume como solución eficaz para favorecer la descarbonización de todos los sectores.

⊙H₂ Azul: Genera emisiones de CO₂ que son capturadas y posteriormente almacenadas o reutilizadas (por ej. para fabricar eco-combustibles). Se trata de un hidrógeno de bajas emisiones.

⊙H₂ Blanco: Hidrógeno que encontramos en la naturaleza normalmente en forma gaseosa. En ocasiones se puede encontrar en depósitos subterráneos.

⊙H₂ Turquesa: El hidrógeno color turquesa se genera mediante la pirólisis del metal fundido, alimentada por gas natural. En el proceso, el gas natural pasa a través de un metal fundido, y libera hidrógeno y carbono sólido, con lo que se evitan emisiones.

⊙Hidrógenos gris, marrón y negro corresponden a procesos contaminantes por uso de combustibles fósiles, procesos industriales, deforestación, quema de bosques, actividades antropogénicas, etc., en su síntesis.

Obviamente, existen muchos otros procesos contaminantes que contribuyen al cambio climático y, en consecuencia, a la contaminación ambiental, al efecto invernadero, lluvia ácida, etc. Se envían a la atmósfera, compuestos nitrogenados, sulfurados, clorados, fluorados, radiactivos, etc., sobre los cuales debe mantenerse un control y apropiada corrección.

La actual producción de gas hidrógeno proviene de procesos que utilizan combustibles fósiles (> 90%)¹², tales como (reformado de vapor, oxidación parcial, reformado autotérmico, gasificación y pirólisis). La producción de hidrógeno verde y azul (figura 2) requiere como fuentes energéticas, las energías renovables y/o combustibles de síntesis verde (NH₃, CH₃OH) y/o poco contaminantes (CH₄, gas natural).

3 - Hidrógeno y Energías Renovables

Las energías renovables, especialmente la eólica y la solar fotovoltaica, que generan electricidad de forma discontinua y que

no siempre se puede almacenar o enviar a la red, tienen en el hidrógeno un vector para conservarla¹³⁻¹⁵. Por eso, el hidrógeno complementa muy bien las limitaciones de la energía solar y viceversa, el elevado gasto de electrolizar el agua tiene en la energía solar (fotovoltaica o eólica) una magnífica aliada. Por eso, podemos decir que la energía solar y el hidrógeno son un binomio fundamental en el desarrollo de la economía del hidrógeno solar. El hidrógeno y el Sol están unidos desde los inicios de los tiempos.

El hidrógeno puede ser producido sin ninguna emisión de dióxido de carbono a partir de sistemas renovables de energía. En este caso la energía para disociar el agua en oxígeno e hidrógeno, la proporciona un sistema que no contamina y puede ser muy barato en el futuro. El oxígeno y el hidrógeno separados se utilizan como combustible para obtener nuevamente electricidad a través de las celdas de combustible. La ventaja de las pilas de combustible que funcionan directamente con hidrógeno gas es que pueden ser útiles para almacenar

el exceso de energía eléctrica producida en momentos de mucho viento, o para usar de noche en lugares con una fuerte radiación solar. Un sistema que incorpore el hidrógeno a partir de fuentes renovables conjuntamente con una pila de hidrógeno es un sistema cerrado, en el cual ninguno de los productos o reactivos (agua, hidrógeno y oxígeno) se escapan hacia el ambiente. El agua consumida por la “pila” se transforma en gases; a continuación, los gases vuelven a transformarse en agua. La energía eléctrica producida por paneles solares es transferida a energía química en forma de gases. Los gases pueden ser almacenados y transportados, para reconvertirse otra vez en electricidad cuando ésta sea necesaria. Este sistema de producción de hidrógeno con energía renovable es realmente sostenible, siempre y cuando se tenga energía solar, eólica o cualquier otra fuente renovable, para poder producir la energía eléctrica allí donde haga falta y cuando sea necesaria.

3.1.- Hidrógeno verde: El hidrógeno verde como alternativa energética, tiene una gran acogida, pues como suma a sus valiosas características y propiedades (recurso energético desde fuentes seguras, disponibles, ilimitadas, accesibles,

variadas, no contaminantes y económicas), es reciclable, de alto contenido energético, almacenable y transportable, y oportuno para la difícil situación contaminante que se vive.

Hidrógeno “verde” de Energía Solar y Electroquímica:

- ☉ H₂ de la energía solar directa (electrólisis fotovoltaica)
- ☉ H₂ en celda fotoelectroquímica
- ☉ H₂ electrólisis con energía solar indirecta (hidroeléctrica, eólica, térmica, mareomotriz, biomasa)
- ☉ H₂ vía producción de amoníaco “verde”

Tal como se ha mencionado, se combinan energías renovables con procesos electroquímicos para la producción del hidrógeno verde. Tres de esos procesos se presentan en la figura 3:

- ☉ Celda solar fotovoltaica para electrólisis directa del agua y obtención de hidrógeno.
- ☉ Celda fotoelectroquímica para la electrólisis directa con luz solar en celda, en algunas ocasiones con asistencia externa
- ☉ Utilización de energía eléctrica procedente de energías renovables para la electrólisis

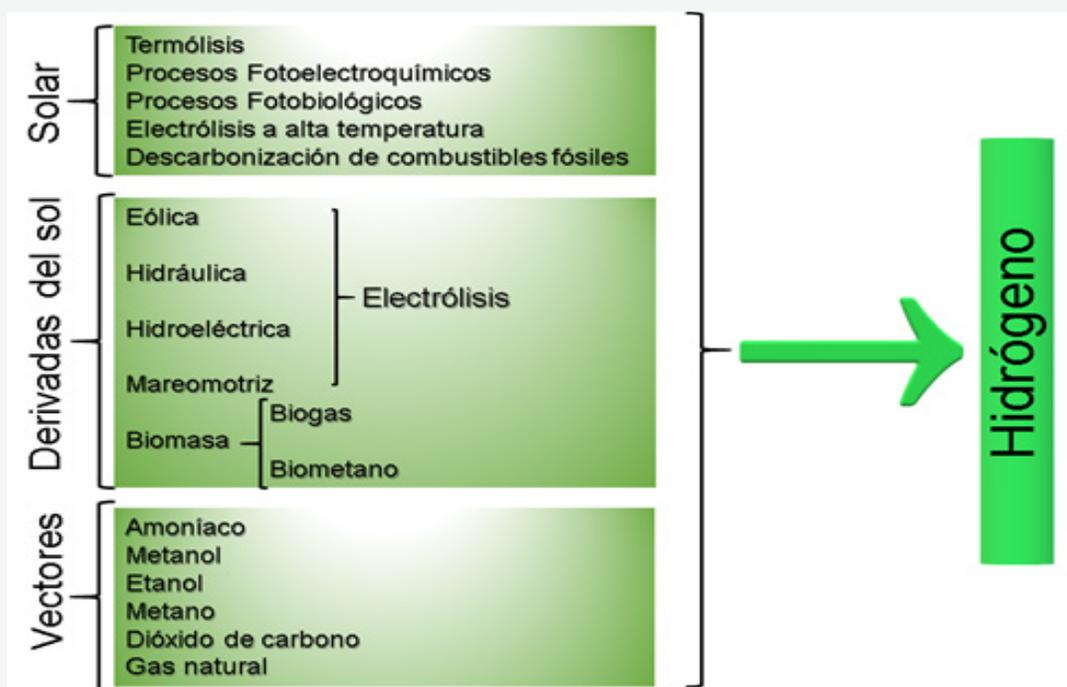
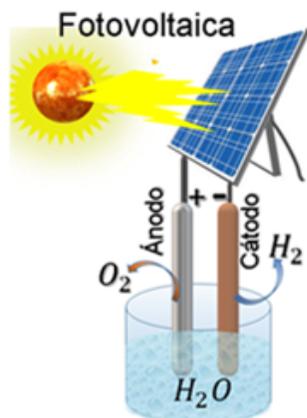
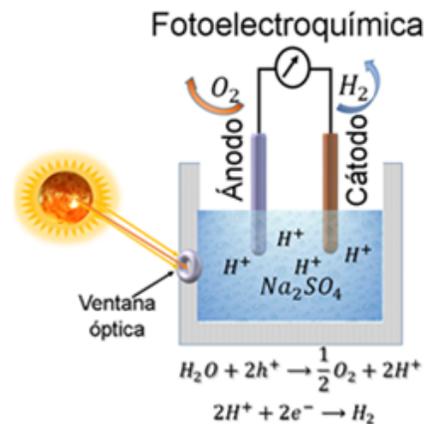


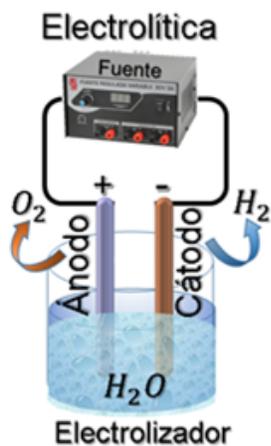
Figura 2. Vías de producción del Hidrógeno Verde (o Azul)



En el sistema fotovoltaico (solar) se utilizan celdas regenerativas para la conversión de luz solar en energía eléctrica. Valores crecientes de eficiencia se obtienen con variaciones, modificaciones optimizaciones en composición y parámetros



En fotoelectrólisis, se utiliza la energía solar para separar directamente el agua. Existe también la fotoelectrólisis asistida, aplicando un voltaje externo para posibilitar, tanto la transferencia electrónica del contraelectrodo a las especies oxidadas, como de huecos del semiconductor a las especies reducidas.



El potencial termodinámico del agua es de 1,23 V, El sobrepotencial asociado al desprendimiento de hidrógeno, puede ser minimizado por medio de un catalizador de negro de platino Pt negro. En el caso del oxígeno, por medio de un catalizador de óxido de Rutenio, RuO₂

Figura 3. Procesos electroquímicos de producción de hidrógeno verde^{9,16}

del agua en celda electrolítica.

Celda solar, o fotovoltaica.

Es un dispositivo en el que un semiconductor de estado sólido posee una región de composición química variable, a la que se le asocia un gradiente de campo eléctrico el cual se utiliza para separar los pares hueco-electrón fotogenerados en la región. La gradación en la composición química se puede obtener de dos modos: i) depositando juntos dos materiales distintos,

o ii) dopando un único semiconductor en un modo asimétrico.

Los tres tipos básicos de celdas solares son: monocristalinas, policristalinas y amorfas.

⊙ Las celdas monocristalinas son preparadas en cilindros largos, seccionados en discos o hexágonos delgados. Este proceso es consumidor de energía y materiales, produce celdas de alta eficiencia (hasta 25%), son costosas y algunas veces son acopladas a lentes y espejos concentradores para incrementar aún más su eficiencia (30%).

Actualmente cubren el 50% del mercado FV. ☉ Las celdas policristalinas son hechas de silicio fundido, moldeado en lingotes o láminas y seccionado en películas cuadradas. Sus costos de producción son menores, también su eficiencia (15%) y cubren un 30% del mercado FV.

☉ El silicio amorfo (a-Si) es esencialmente silicio rociado sobre un vidrio o superficie metálica, en películas delgadas. Es de bajo costo y baja eficiencia (5%).

Actualmente se manejan celdas de las llamadas segunda, tercera y cuarta generación, con importantes aportes en sus propiedades tales como composición, estabilidad, rendimiento, costos, tiempo de vida, etc. Se utilizan otros materiales tales como arseniuro de galio (Ga-As), diseleniuro de cobre e indio (CuInSe_2) y telurio de cadmio (CdTe), orgánicos, polímeros, peroskitas, estos ofrecen altas eficiencias y propiedades interesantes como por ejemplo la posibilidad de modificaciones en cuanto a su sensibilidad luminosa. El acoplamiento de celdas en arreglos multicapas permite aumentar la captura de radiación. Este tercer tipo de celdas parece ser el más promisorio a futuro.

Se continúa el trabajo, en la reducción de costos, en la producción de energía eléctrica solar, se busca incrementar la eficiencia de las celdas, reducir sus costos y los costos del resto del sistema, mejoras en los diseños, arreglos e instalaciones. La electricidad solar está llamada a ser una fuente significativa de energía este siglo.

Celdas fotoelectroquímicas (CFE).

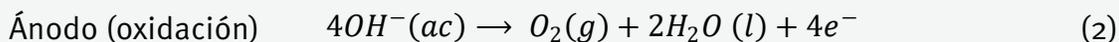
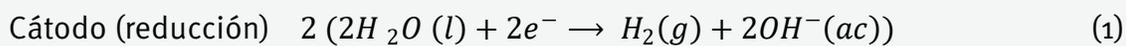
La fotoelectrólisis del agua para la producción de energía almacenada en forma de H_2 es muy atractiva en la actualidad puesto que la fuente primaria de energía, el sol, y el medio de reacción, el agua, son accesibles, renovables y ambientalmente benignos. La irradiación de semiconductores puede generar energía eléctrica, electroquímica o química. El sistema para la producción de hidrógeno consiste en su forma más simple, de un electrodo semiconductor y un contraelectrodo de platino, sumergidos en el medio electrolítico. Cuando el

semiconductor es irradiado con luz más energética que su brecha energética, electrones de la banda de valencia son excitados a la banda de conducción, se genera una fotocorriente capaz de separar el agua en sus componentes, hidrógeno en la superficie del semiconductor y oxígeno en la superficie del electrodo de platino. Este tipo de celdas no se utilizan sólo para la generación de combustibles químicos, sino también para generar electricidad. Para que una celda CFE opere eficientemente los electrones fotogenerados se deben mover a través del circuito externo hacia el otro electrodo y reducir la especie R^+ a R. Durante la generación de electricidad en una celda CFE, las reacciones electroquímicas que ocurren en el electrolito sirven sólo para transportar corriente. Sin embargo, uno de los mayores problemas encontrados en el desarrollo de celdas CFE para la conversión de la energía solar estriba en que todos los semiconductores que absorben luz visible son termodinámicamente inestables a la oxidación por los huecos fotogenerados. Se ha mostrado que semiconductores tipo n-CdS y CdSe se estabilizan contra la corrosión anódica cuando se utiliza el par $\text{Na}_2\text{S}_x / \text{Na}_2\text{S}$ y NaOH 1M como electrolito.

La utilización de monocristales permite una mayor eficiencia ya que se minimiza la recombinación de huecos y electrones que ocurre normalmente en los límites de grano. Una desventaja del empleo de monocristales resulta de su alto costo de fabricación. Una alternativa sería el uso de semiconductores policristalinos cuya producción es más fácil y económica.

Celdas Electrolíticas. Cuando el volumen de hidrógeno requerido en alguna aplicación es moderado, el hidrógeno se obtiene mediante electrolisis de agua. La reacción electrolítica se realiza en medio alcalino debido a que en este medio se incrementa la conductividad eléctrica. La mayor parte de los electrolizadores son de tipo tanque con los electrodos dispuestos en paralelo.

El calor liberado en el proceso se elimina recirculando agua alrededor de las celdas. Adicionalmente se suministran nuevos tipos de electro-catalizadores que son capaces de



disminuir el sobrevoltaje, lo que supone una reducción en los costos.

3.2.- Amoníaco Verde (desde y con suministro de hidrógeno verde): Su síntesis se realiza por reacción del hidrógeno verde con nitrógeno del aire, almacenamiento de H₂, (Figura 4). A este proceso se atribuyen logros tales como:

- ⊕Alta densidad energética (50% más de H₂ en el NH₃ que en el propio H₂ líquido)
- ⊕Estabilidad por períodos largos
- ⊕Manejo conocido y controlado
- ⊕Ausencia de emisiones de CO₂
- ⊕Facilidad de transporte y almacenamiento

(procedimientos existentes).

En la utilización del amoníaco como combustible para las celdas de combustible, puede descomponerse en nitrógeno e hidrógeno de forma externa o puede introducirse directamente en la celda. Cuando el hidrógeno almacenado en amoníaco es requerido externamente, se establece el proceso de su liberación, éste es luego purificado para su incorporación en celdas de combustible y posterior suministro de energía (Figura 5).

También estos contaminantes atmosféricos consiguen aplicaciones en otros procesos

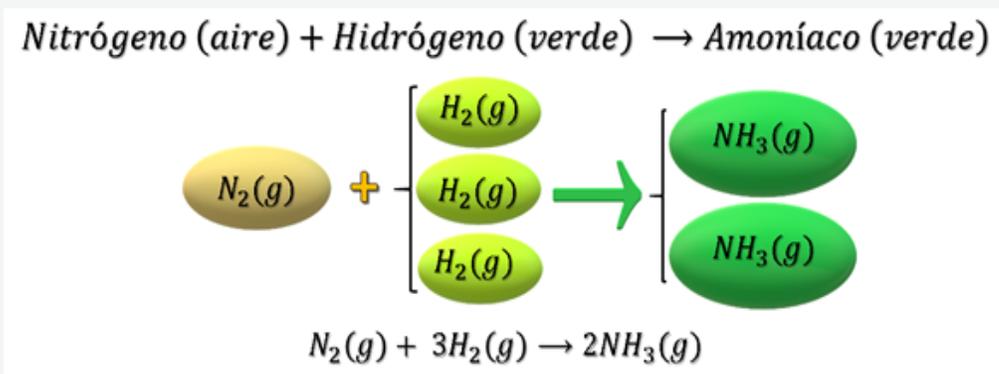


Figura 4. Síntesis de amoníaco verde

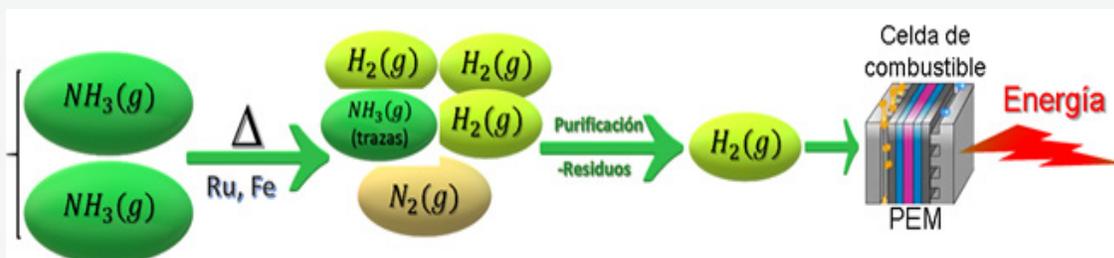
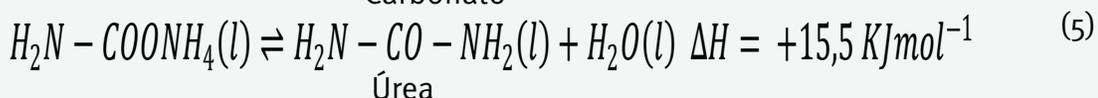


Figura 5. Suministro de hidrógeno verde desde el amoníaco a celdas de combustible¹⁷



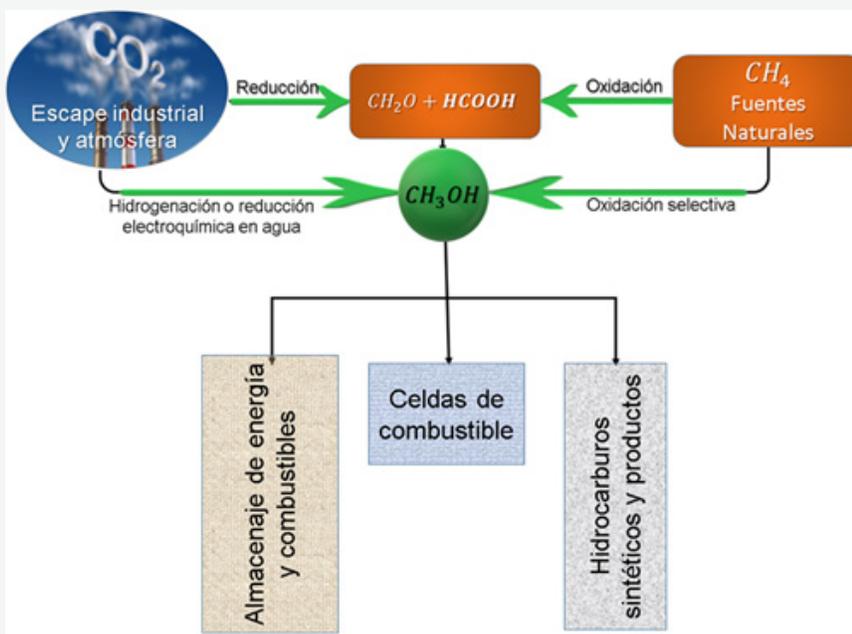


Figura 6. Síntesis del metanol verde y usos en energía (18, modificada)

de interés económico y social. Se presenta como ejemplo un proceso descontaminante de CO₂, con producción del fertilizante úrea.

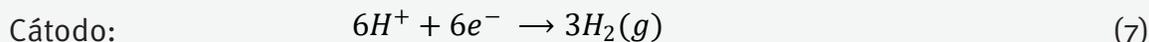
3.3.- Fuentes del Hidrógeno Azul

3.3.1.- Proveniente del metanol verde.

El metanol se presenta como una molécula que permite transportar y almacenar el hidrógeno de una forma mucho más segura y eficiente. Su síntesis puede hacerse por reacción del hidrógeno verde con especies contaminantes ambientales como CO₂, CH₄, CH₂O, HCO₂H (Figura 6) y puede ser utilizado posteriormente, en la alimentación directa de celdas de combustible o por suministro a la celda del hidrógeno allí almacenado, ello,

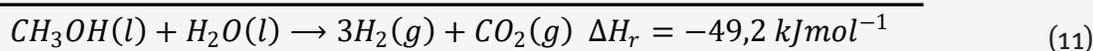
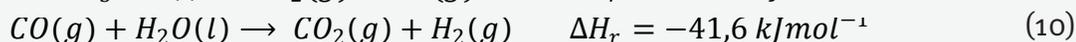
en adición a sus múltiples y variados usos¹⁸. Una vez transportado el metanol, es necesario hacerlo reaccionar para poder extraer el H₂ contenido en su estructura. La electrólisis del agua es el método que permite producir el hidrógeno de mayor pureza (95.5 – 97.2) % mol. El problema de este proceso es que requiere mucha energía, alrededor de 285 kJ por mol de agua disociado. Las reacciones en ánodo, cátodo y total, del metanol, son respectivamente, las Reacciones 6-8.

El proceso redox nos evidencia la producción final de hidrógeno azul. El dióxido de carbono producto, puede ser reciclado con producción nuevamente de metanol.

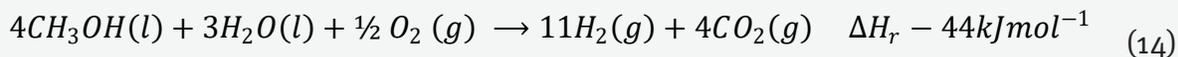
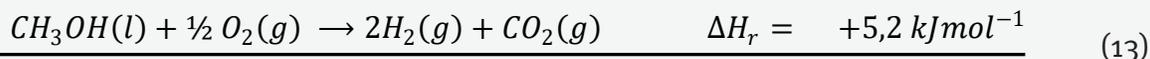
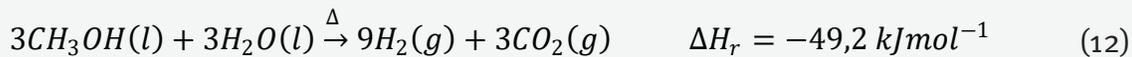


Otros procesos para la recuperación de hidrógeno del metanol son:

Método de recuperación de H₂ por reformado al vapor del metanol



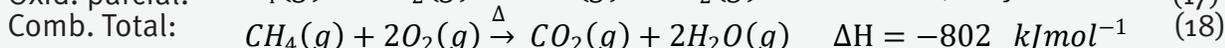
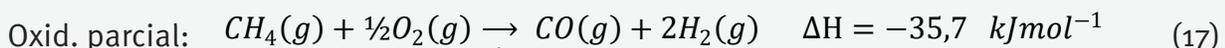
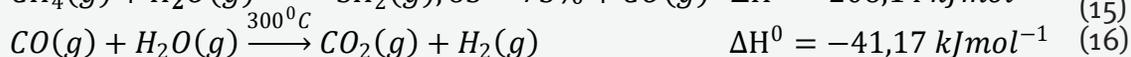
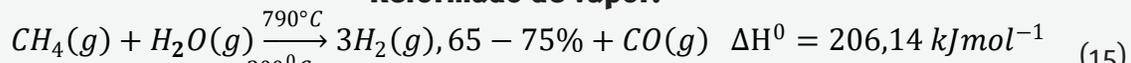
Combinando el reformado al vapor del metanol con su oxidación parcial se obtiene la ecuación 14:



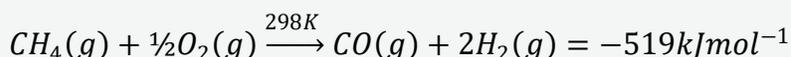
Con una más alta eficiencia en la liberación del vector energético hidrógeno.

3.3.2.- Proveniente del Metano (CH₄)¹⁹

Reformado de vapor:

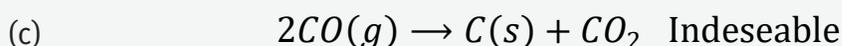
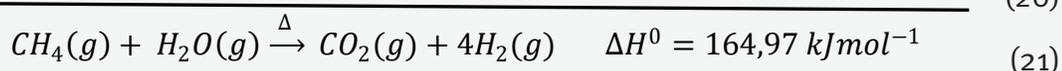
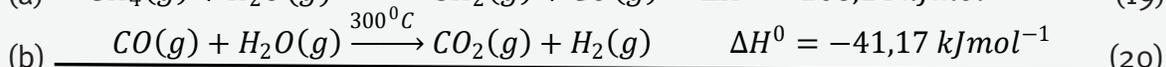


Reformado Autotérmico:



3.3.3.- Hidrógeno desde Gas Natural¹²

Reformado de Vapor:



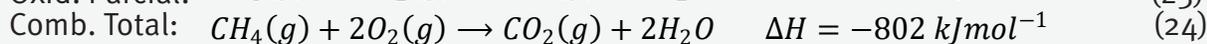
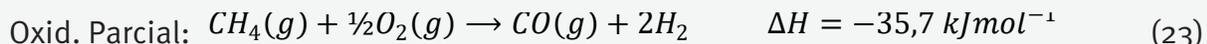
La tabla 1 muestra las condiciones de reacción en reformado de vapor de metano (Ec. a y b).

Tabla 1.- Condiciones de reacción en reformado de vapor de metano

(a)	
Item	Característica
Reacción	Endotérmica
Reactor	Multitubular
Fase	Gas
Catalizador	Níquel
Temperatura	790°C
Presión	13 atm

(b)	
Item	Característica
Reacción	Exotérmica
Reactor	Tubular
Fase	Gas
Catalizador	Cu-Zn/Fe ₂ O ₃
Temperatura	(220-320)°C
Presión	26 atm

Oxidación Parcial: Suministro de una cantidad insuficiente de oxígeno para la Combustión completa, produciendo así solo hidrógeno y monóxido de carbono como subproductos.



⊗80% rendimiento y 99,999 pureza del H₂

⊗Reformado de MeOH(200°C);: 99% rendimiento

Reformado Autotérmico: El proceso de reformado autotérmico (RA) es una combinación de procesos de Reformado con vapor de agua (RV) y Oxidación Parcial (ec. 21), con el calor necesario generado por la reacción de oxidación parcial usando aire u oxígeno (ec.23).



El esquema mostrado en la figura 7, incorpora otros posibles vectores intermediarios para la producción de hidrógeno.

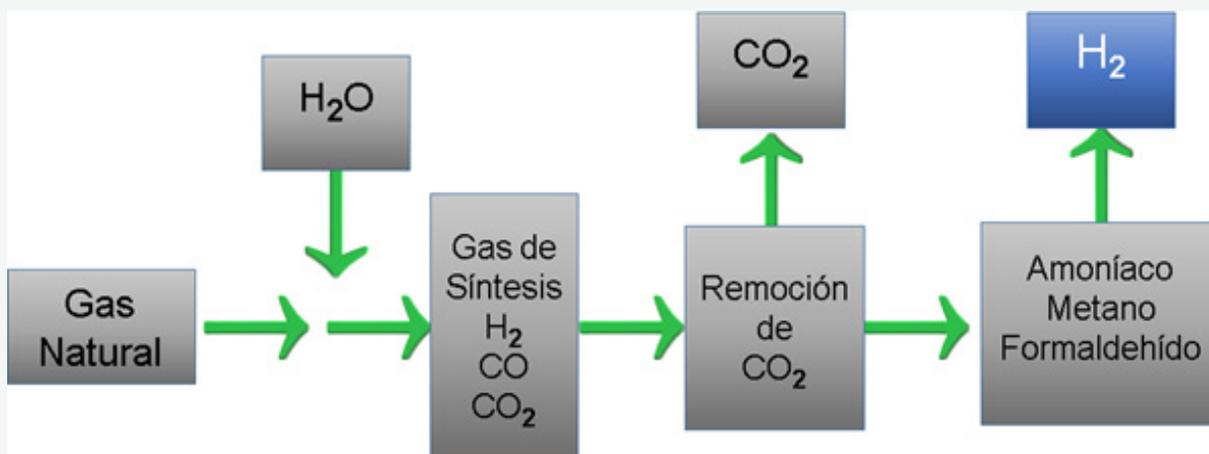
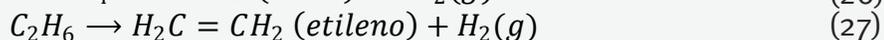
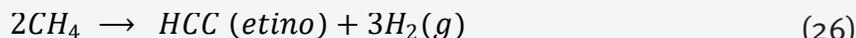


Figura 7. Distintos vectores para producción de hidrógeno

También por gasificación y pirólisis: La pirólisis es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. El proceso de pirólisis tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos (coque, bio-aceite y gas). El hidrógeno color turquesa se sintetiza por pirólisis, tal como se muestra más adelante.

Vía Deshidrogenación: La ruta de deshidrogenación de gas natural es también una ruta para obtención de hidrógeno con baja contaminación.



Obtención de energía por reciclaje de especies carbonadas²⁰. Son variados los procesos existentes de captura y conversión, en muchos casos en forma cíclica, para regeneración de especies vectores energéticas. A modo de ejemplo se presenta un diagrama (figura 8), de un proceso cíclico de regeneración del vector metanol verde, a partir de dióxido de carbono y/o metano.

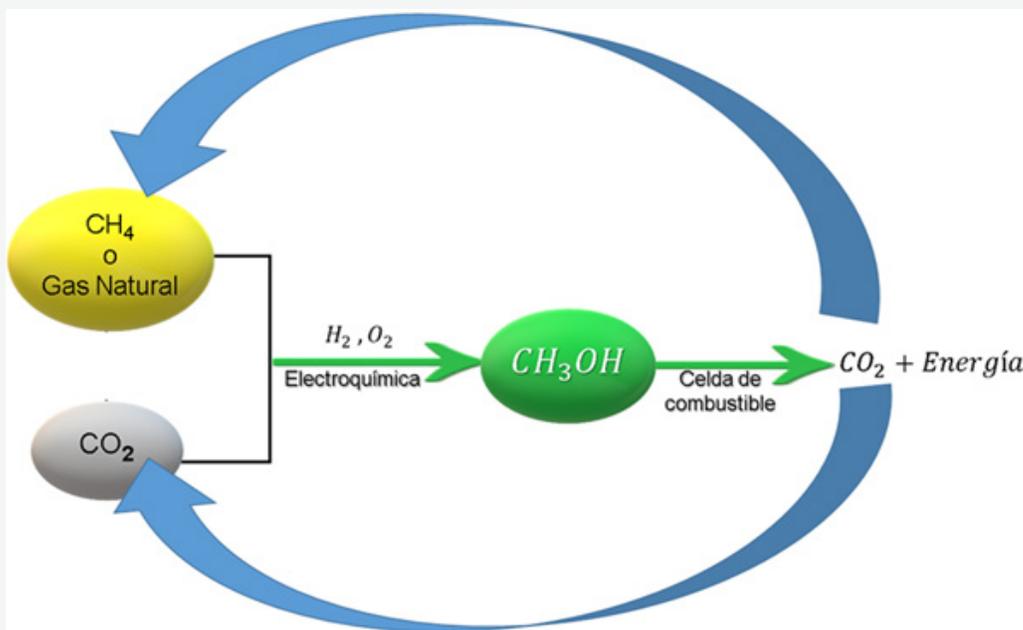


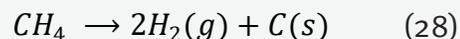
Figura 8. Obtención de energía por reciclaje de carbonados

3.4.- Hidrógeno Blanco: Lo encontramos en la naturaleza en forma gaseosa, también en depósitos subterráneos. Desconocemos su origen y procedencia, pudiera ser natural, producto de cracking o subproducto de procesos industriales, o combinación de ellos. No será de una gran abundancia y suministro permanente, actualmente no se le considera aprovechable.

3.5.- Hidrógeno Turquesa: El hidrógeno color turquesa se genera mediante la pirólisis del metal fundido, alimentada por gas natural. En el proceso, el gas natural pasa a través de un metal fundido, y libera hidrógeno y carbono sólido, con lo que se evitan emisiones.

Otra opción²¹ es la transformación del gas natural, en hidrógeno y carbono mediante procesos pirolíticos controlados. La pirólisis catalítica del gas natural a temperatura media produce H₂, la reacción puede realizarse mediante la aplicación de la energía de una fuente de microondas. Por esta vía se ha conseguido descomponer de forma eficiente una corriente de CH₄ en H₂ puro y filamentos carbonosos, obviamente en ausencia de cualquier óxido de carbono (no existe oxígeno en el medio de reacción). Los residuos de carbono, subproducto de la reacción, proporcionan un valor añadido

adicional al H₂ producido ya que tienen excelentes propiedades de adsorción. Una forma de llevar a cabo la descomposición del CH₄ en sus componentes (H₂ y C) de forma más suave que la propia pirólisis es mediante incorporación de catalizadores al reactor. Los catalizadores disminuyen la energía de activación del proceso de pirólisis y aumentan, por lo tanto, la velocidad del proceso de generación de hidrógeno. Los catalizadores más idóneos para realizar este proceso están constituidos por partículas de níquel y hierro, finamente dispersas sobre soportes inorgánicos de naturaleza mesoporosa, ej. Al₂O₃ y SiO₂. En estos catalizadores se observó que la cantidad de carbón depositado crece mucho más deprisa en la operación pulsada que cuando se realiza por calentamiento. Este tipo de sistemas producen H₂, exento de óxidos de carbono.



Los materiales nano carbonosos, nanotubos de carbón, nanofibras, han recibido estos últimos años especial atención debido a sus excelentes propiedades (conductividad térmica, eléctrica, óptica, mecánica) y potencial de aplicación energética.

3.6.- Hidrógeno y Celdas de combustible. El hidrógeno se encuentra en abundancia

en la naturaleza, principalmente como constituyente del agua. Almacena mayor cantidad de energía por unidad de peso (33,3 kWh/kg) que cualquier otra sustancia y su combustión produce agua, sin contaminar el ambiente. Por otra parte, puede almacenarse fácilmente como gas comprimido (-200 bar), como líquido a bajas temperaturas (-253 °C) o como hidruro metálico, formando estructuras sólidas. El hidrógeno también se puede usar directamente en quemadores o motores produciendo calor por combustión limpia, o convertir directamente su energía química en electricidad en celdas de combustible, en un proceso de alta eficiencia. Puesto que el hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza, se debe gastar energía para producirlo, tal como en el caso de la electricidad. La alta eficiencia de conversión (> 50%) de las celdas de

combustible permite un aprovechamiento máximo de la energía química contenida en los combustibles (hidrógeno, gas natural, biocombustibles, etc.), asegurando de este modo el uso racional de los recursos^{22,23}. El uso de celdas de hidrógeno (figura 9) está plenamente justificado debido a que es un elemento que abunda en la naturaleza y su reacción con el oxígeno resulta no contaminante, dado que como productos de la reacción se generan vapores de agua y energía, de acuerdo a la siguiente reacción:



En el campo del transporte^{24,25}, los llamados vehículos de hidrógeno utilizan este elemento como combustible, para hacer funcionar la batería que genera la electricidad para su propulsión.

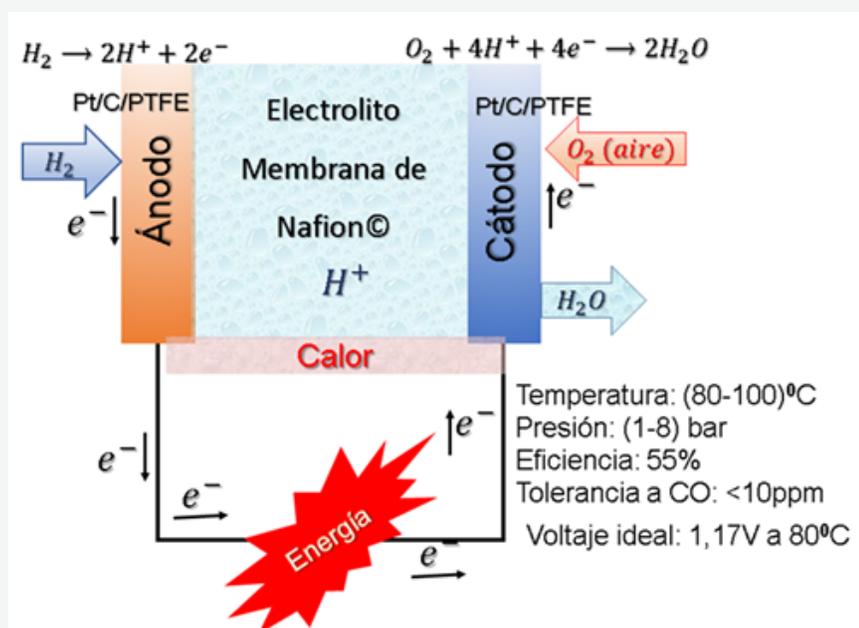


Figura 9.- Celda de combustible de Hidrógeno tipo PEM

Conclusion

El hidrógeno es un combustible limpio, no contaminante, con alta densidad energética en base másica, liviano, estable, no corrosivo, de alta disponibilidad. Es un vector energético obtenible por numerosas vías, actualmente y mayoritariamente a partir de combustibles fósiles y con requerimientos ahora de producción desde fuentes no contaminantes. Por ello, se acude ahora a las energías renovables, energías secundarias y en nuestra área, con los métodos electroquímicos. La combustión de hidrógeno en estas condiciones genera agua y energía con poca o ninguna contaminación. Se considera que por esta vía será posible el desarrollo de un sistema de energía sostenible.

El hidrógeno contribuye, como vector energético, a la descarbonización ambiental, es ampliamente utilizado en los sectores del transporte y del calor residencial e industrial, así como en aquellos sectores donde se emplea como materia prima. El transporte, marítimo, ferroviario y vehículos pesados requieren producción, transporte y distribución de combustible, sin emisiones de CO₂ ni gases contaminantes, con eficiencia y costes competitivos.

Adicionalmente, la interconexión entre los sistemas eléctrico y gasista en un nodo de conversión de energía eléctrica en gas renovable (sea hidrógeno o metano sintético) permite el almacenamiento de dicha energía, a la vez que actúa de buffer o tanque de reserva energética, ya sea momentánea o estacional, y que permite recuperarla para generar nuevamente electricidad y/o calor.

La utilización de las celdas de combustible de hidrógeno luce conveniente y apropiada, con una alta eficiencia y sin emisión de contaminantes y existen actualmente importantes adelantos por la implantación de esta tecnología en el sector, bastante contaminante, del transporte y automotriz. Se encuentran ya en comercio las celdas de combustible Alcalina, PEM y SOFC.

References

- 1.- Appannagari RR. (2017). Environmental pollution causes and consequences: a study. North Asian Int Res J Soc Sci Humanit, 3(8), 151-161.
- 2.- J Márquez, OP Márquez, Y Martínez, K Márquez, E Weinhold, R Ortiz. (2022). Electroquimienergía y Cambio Climático: Una Revisión. InfoANALÍTICA, 10(1), 43-82.
- 3.- Stephen R. (2023). "Causas y consecuencias de la contaminación ambiental". <https://www.significados.com/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-ambiental/>.
- 4.- Libro de Ciencia y Tecnología N°2. (2009). Tecnológico de estudios Superiores de Ecatepec. Tecnologías Solar, Eólica, hidrógeno, Pilas de Combustible como fuentes de Energía. ISBN 978-607-95065-0-6. Méjico.
- 5.- Márquez J, Márquez OP. (2018). Electroquimienergía. Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE). ULA-Mérida. Venezuela. 1(2)9-26. <http://erevistas.saber.ula.ve/rite>.
- 6.- Turner J, Sverdrup G, Mann MK, Maness PC, Kroposki B, Ghirardi M, et al. 2008. Renewable hydrogen production. International Journal of energy research. 32(5) 379-407. 27.
- 7.- Dincer I. (2012). Green methods for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 37, 1954-1971.
- 8.- Asoc. Nac. Ingenieros ICAI – Univ. Pontificia Comillas. 2007. Avances de Ingeniería: El Hidrógeno y la Energía. ISBN: 978-84-932772-9-1. Madrid.
- 9.- Márquez J, Márquez OP, Weinhold E, Márquez K. (2021). Hidrógeno desde la energía Solar (con Electroquímica). Una revisión. Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa RITE 4(1)11-27. <http://erevistas.saber.ula.ve/rite>.
- 10.- IRENA-Green hydrogen policy. 2020. Selección de tipos de hidrógeno. Pag.8.
- 11.- Van de Graaf Thijs. 2021. Energía y Geoestrategia. Cap. 3. El hidrógeno limpio: la piedra angular de un nuevo escenario geopolítico. 191-241.

- 12.- Rase HF. 1977. Chemical Reactor Design for Process Plants. Wiley 1st Edition.
- 13.- El-Shafie M, Kambara S, Hayakawa Y. (2019) Hydrogen Production Technologies Overview. Journal of Power and Energy Engineering ,7, 107-154. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007>.
- 14.- Dincer I, Acar C. (2015) Review and Evaluation of Hydrogen Production Methods for Better Sustainability. International Journal of Hydrogen Energy, 40,11094-11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>.
- 15.- Bhandari, R., Trudewind, C.A. and Zapp, P. (2014) Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Electrolysis Review. Journal of Cleaner Production, 85,151-163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.04>.
- 16.- Márquez OP, Márquez J. (2020). Hidrogeno vía Electroquímica, Cap. 16. Una Educación Universitaria de Calidad (Tomo II). Publicación Vicerrectorado Académico ULA. ISBN 978-980-11-1858-9. ULA-Mérida-Venezuela.
- 17.- Castro MA. 2021. Sistemas de producción de potencia utilizando amoníaco y su aplicación ciclos combinados. Tesis de Grado. Dpto. Ingeniería Energética. Sevilla – España.
- 18.- Suero MI. 2021. Diseño y Simulación de una Planta de Producción de Metanol a partir de Biomasa. Tesis de Grado. Univ. De Valladolid – España.
- 19.- Villacampa JI, Latorre N, Ubieto T, Monzón A, Royo C. 2004. Producción de Hidrógeno por craqueo catalítico de metano sobre catalizadores Ni-Al₂O₃. Caracterización e influencia de las condiciones de operación. Lucas Mallada, 11:229-244. Huesca.
- 20.- Márquez OP, Martínez Y, Balladores Y, Márquez K, Weinhold E, Márquez J. 2021. Electroquimienergía y Compuestos Monocarbonados: una revisión. Revista de Ingeniería y tecnología Educativa, RITE. 4(2)43-53. ISSN 2665-0339.
- 21.- Fierro JLG, La Parola V, Thomas S, Guil-López R, Navarro RM. (2003). Pilas de Combustible. Producción de hidrógeno a partir del gas natural sin emitir dióxido de carbono. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC. 67-70.
- 22.- Larminie J, Dicks A. “Fuel Cell Systems Explained”, Second Edition (2003). SAE Bookstore.
- 23.- Barreras F, Lozano A. 2012. Hidrógeno. Pilas de Combustible tipo PEM. LITEC-CSIC. Universidad de Zaragoza. España. www.energia2012.es.
- 24.- De la Torre Iglesias-Sarría P. 2019. Trabajo de Grado: Hidrógeno y Pilas de Combustible. Perspectivas de Futuro en el Transporte. Colegio Universitario de Estudios Financieros. Madrid.
- 25.- García G. 2018. Tipos de vehículos eléctricos: funcionamiento y características de cada tecnología. (<https://www.hibridosyelectricos.com/>).