

Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Panorama en Colombia

Hydrogen Production from Solar Energy. The Overview in Colombia

Andrea Lache Muñoz*

Universidad de América, Bogotá, Colombia.

FECHA DE ENTREGA: 1 DE JUNIO DE 2015

FECHA DE EVALUACIÓN: 17 DE JUNIO DE 2015

FECHA DE APROBACIÓN: 25 DE JUNIO DE 2015

Resumen La generación de energía a partir de fuentes renovables como el sol, representa una oportunidad para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales han sido los responsables de la aceleración del cambio climático, en los últimos años. A su vez, el hidrógeno es considerado el vector o gestor energético ideal para las energías de tipo renovables, que puede facilitar la implementación de un nuevo modelo de suministro energético, para países como Colombia, que en un mediano y largo plazo, la energía solar ampliamente disponible, promueva la independencia energética, garantice el suministro en todo el territorio y aporte tanto bienestar ambiental como social en materia energética.

Abstract Power generation from renewable sources like the sun; represents an opportunity to reduce the emission of greenhouse gases, which are responsible for the acceleration of climate change in recent years. In turn, hydrogen is considered an ideal energy carrier for renewable energy, which will allow the implementation of a new model of energy supply, interest to countries like Colombia, where in the medium and long term, solar energy widely available, promote energy independence, ensure supply throughout the country and provide both environmental and social welfare in the energy field.

Palabras Clave: energía solar térmica, fotovoltaica, concentración solar, hidrógeno.

Keywords: solar thermal energy, photovoltaic, solar concentration, hydrogen.

* Ingeniero Químico de la Fundación Universidad de América, Master en Energías renovables, pilas de combustible e hidrógeno, de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo en convenio con el Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en España; y Diplomado como Gestor Energético Avanzado de la Universidad Nacional de Colombia; y actualmente Directora del Grupo de Investigación Energías Alternativas de la Fundación Universidad de América. andrea.lache@investigadores.uamerica.edu.co

1. Introducción

En la actualidad, el escenario energético mundial se ha visto enfrentado al reto de seguir garantizando el suministro de energía como respuesta al incremento de la demanda, y a la consecuencia del crecimiento demográfico e industrial de cada país, dentro de un esquema de responsabilidad ambiental que propenda por asegurar el desarrollo sostenible. Este panorama unido a la creciente preocupación por los efectos del cambio climático, el cual ha sido definido como “la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional” [1], ha incentivado el estudio, la investigación y la generación de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de energía inagotables o mejor conocidas como renovables (el sol), para favorecer la independencia energética de cada país, y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

El sol es la principal fuente de energía, a partir de la cual se han venido desarrollando tecnologías para el aprovechamiento de su energía. Ésta es “resultado de reacciones nucleares de fusión que llegan a la tierra a través del espacio en paquetes de energía llamados fotones (luz), que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre” [2] dando lugar a la energía solar térmica, la energía solar fotovoltaica, la energía solar de concentración, la energía eólica y la energía a partir de biomasa primaria, entendida esta como “La energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica mediante la fotosíntesis” [3]. Otras fuentes de energía consideradas renovables, son la energía hidráulica, las formas de aprovechamiento energético de los diferentes tipos de biomasa y la energía geotérmica.

El creciente aprovechamiento energético de las fuentes renovables, tuvo un primer momento de relevancia en los años 70 como consecuencia de la crisis del petróleo, debido a la concentración de éste en países caracterizados por la inestabilidad política [4]. Posteriormente y a partir de los compromisos adquiridos por los países industrializados, luego de la firma del protocolo de Kyoto en 1997, se renovó y consolidó la necesidad de incorporar las energías renovables como parte de la matriz energética mundial; por lo que desde esas primeras instancias se evidenció que el principal desafío para su implementación a gran escala, es la gestionabilidad, pues no se puede tener certeza de la disponibilidad de sol o viento en las horas de mayor consumo, como si es posible con las energías fósiles o las centrales hidroeléctricas.

La mencionada falta de sincronización entre la oferta de energías renovables y la demanda energética ha propiciado el interés en la implementación de una economía del hidrógeno [5], en la cual éste actúe como vector energético, capaz de almacenar y transportar la energía proveniente de fuentes renovables, porque además presenta, ventajas tales como : (a) su densidad energética es mayor que la de los combustibles fósiles convencionales [6]; (b) también puede ser empleado como materia prima en pilas de combustible, las cuales pueden llegar a producir energía eléctrica con una eficiencia de hasta el 60 % [7], debido a que no están sujetas al ciclo de Carnot; es decir, es un proceso más eficiente que los motores de combustión interna cuyas eficiencias no superan el 35 %; y (c) adicionalmente no emite gases de efecto invernadero [8], lo que a mediano y largo plazo contribuye a

la desaceleración del cambio climático. Es así como el hidrógeno llegaría a jugar un papel importante en la gestión de energías renovables para la estabilización de la oferta y la demanda de energía térmica, eléctrica y motriz, tal como lo muestra la figura 1.

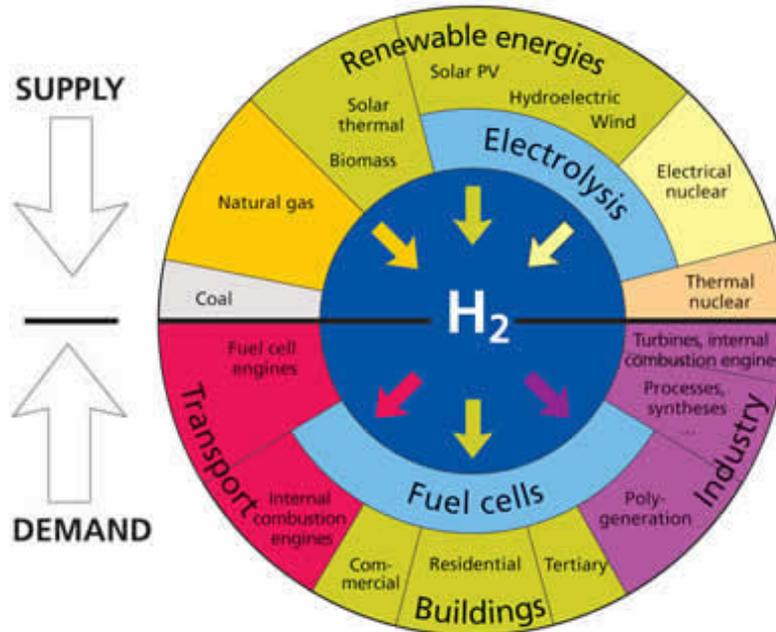


Figura 1. Modelo de demanda y suministro de hidrógeno [9].

En Colombia, al igual que en el mundo, se ha reconocido la importancia de incorporar las energías renovables dentro de la oferta energética nacional, especialmente para Zonas No Interconectadas (ZNI), toda vez que en el país actualmente la energía eléctrica es generada principalmente por plantas hidroeléctricas (alrededor de un 70 %) [10] y por plantas termoeléctricas alimentadas por combustibles fósiles, como se puede apreciar en la figura 2, para el año 2013. Bajo este esquema el valor por KW tiene un costo bajo en comparación con el costo asociado a la producción de energía eléctrica a partir de cualquiera de las formas de energía solar.

Por esta razón, la Ley 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, firmada el 13 de mayo de 2014, está principalmente enfocada a garantizar el suministro energético en las ZNI, porque se reconoce el gran potencial del país para diversificar la matriz energética actual, dada su ubicación geográfica privilegiada y estratégica para planear proyectos, empleando cada una de las opciones de energías renovables ya mencionadas.

La implementación de esta Ley, en un mediano y largo plazo, representa una oportunidad favorable para que las energías renovables se tornen económicamente viables también en las Zonas Interconectadas.

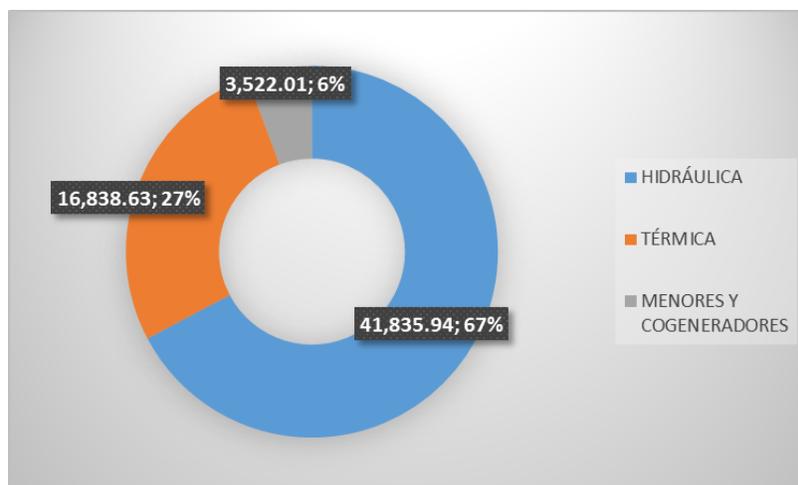


Figura 2. Composición de la generación del SIN (Sistema Inter-Conectado) en 2013, GWh. [11]

2. Energía solar

Como se ha mencionado son tres las formas principales de aprovechamiento directo de energía solar: solar térmica, solar fotovoltaica y solar de concentración, de las cuales las dos últimas son de particular interés para la producción de hidrógeno, como se expondrá más adelante.

Los sistemas de energía térmica de baja temperatura son considerados la primera forma de aprovechamiento de la energía solar, los cuales producen calor a partir de la radiación infrarroja del sol [12], para calentar un fluido a una temperatura máxima promedio de 100 °C [13], especialmente agua, para aplicaciones a nivel residencial, en climatización de piscinas, calefacción ambiental o procesos de secado [14]. El elemento captador de estos sistemas, como se puede observar en la figura 3, es el colector solar, que principalmente puede ser de placa plana o de tubos.

La temperatura que se alcanza en los sistemas de energía solar térmica mencionados no es suficiente para que estos puedan ser empleados de manera favorable en procesos termoquímicos como la descomposición de la molécula del agua o la generación de energía eléctrica que posteriormente se puedan aprovechar en un proceso electrolítico, y así producir hidrógeno.

La segunda vía para el aprovechamiento de la energía solar, es la energía solar fotovoltaica, la cual permite la generación directa de energía eléctrica a partir

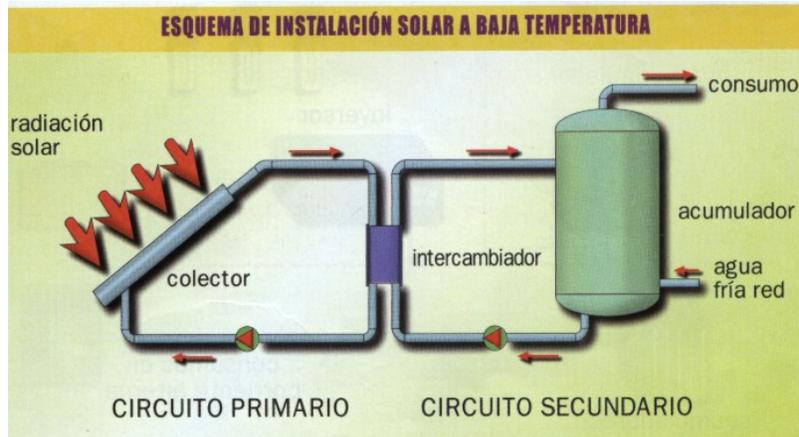


Figura 3. Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura con aplicación de agua caliente sanitaria [15].

de la radiación solar [16], a través de la “energía que los fotones de los rayos solares, le pueden ceder a la superficie de un material semiconductor, como lo son las placas fotovoltaicas fabricadas a partir de minerales semiconductores tales como el silicio” [2]. Este fenómeno es conocido como efecto fotovoltaico sin ciclos térmicos, mecánicos o reacciones químicas como lo mencionan Fonash, Green y Nelson [17]. El crecimiento a escala comercial de las aplicaciones basadas en la energía solar fotovoltaica se ha venido dando de manera paulatina con las mejoras en la tecnología, en donde el silicio sigue siendo el principal componente de las células o celdas fotovoltaicas de diferentes tipos y características, como se puede ver en la figura 4.

Las celdas son agrupadas dentro de un módulo fotovoltaico, en serie y en paralelo, con el propósito de “entregar la tensión y corriente adecuadas” [16]. La cantidad de energía eléctrica que genera un módulo de celdas fotovoltaicas depende del área expuesta a los rayos solares, es decir, del número de celdas agrupadas y de la correcta orientación de los módulos, puesto que, de acuerdo con la ubicación geográfica, varía el ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre la superficie de la tierra y, en consecuencia, varía el nivel de radiación efectiva sobre el modulo fotovoltaico [16], por lo que se hace necesario establecer las condiciones más favorables para cada sitio. Una incorrecta instalación puede afectar no solo la eficiencia del módulo sino que puede causar daños en el mismo.

Los sistemas fotovoltaicos requieren de sistemas auxiliares que permiten el uso de la energía generada, tanto de sistemas aislados para autogeneración, como para sistemas conectados a red eléctrica, como se puede ver en la figura 5, porque los módulos generan corriente continua a un voltaje regularmente entre 12 y 48 V [2], razón por la cual se emplean diversas configuraciones de acuerdo con la aplicación.

La tercera vía para el aprovechamiento directo de la energía solar, son los sistemas de concentración solar térmica, también conocidos como energía solar

	Silicio monocristalino	Silicio policristalino	Capa fina (silicio amorfo)
η célula	14% - 17%	12% - 14%	monocristal 4-6% tándem 7-10%
Ventajas	η elevada η constante	menor coste producción más simple	menor coste influencia de la temperatura reducida
	tecnología fiable	dimensionamiento óptimo	mayor salida energética con radiación difusa
Desventajas	mayor energía cantidad necesaria para producción	sensibilidad a impurezas del proceso de fabricación	mayores dimensiones coste de estructura y tiempo de montaje

Figura 4. Comparación entre módulos fotovoltaicos de diferente tipo de Silicio [18].

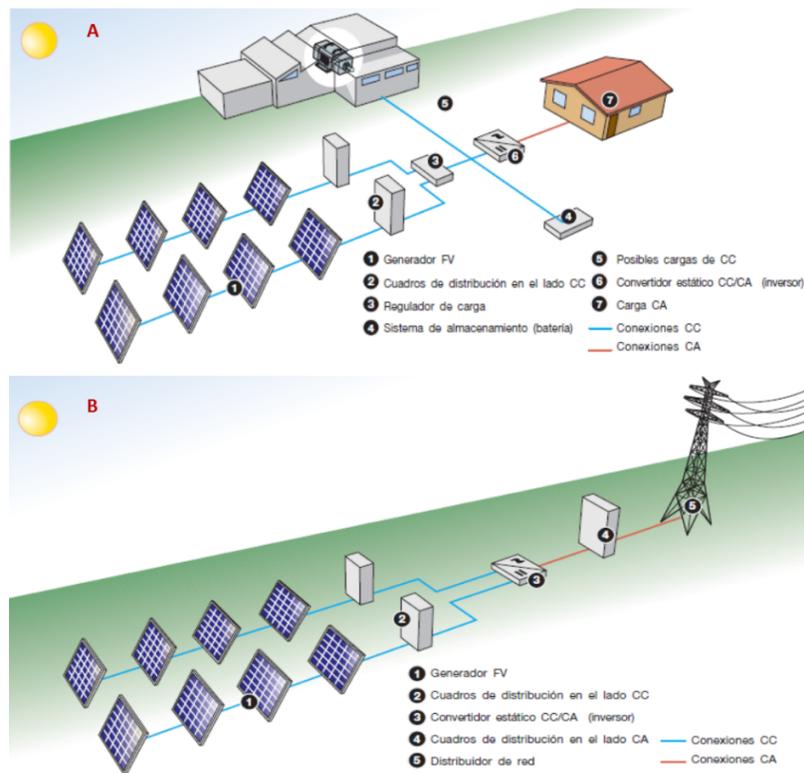


Figura 5. A. Esquema de una planta FV aislada. B. Diagrama de una planta FV conectada a red eléctrica [18].

termoeléctrica o termosolar, cuyo objetivo principal es aprovechar la radiación directa, concentrando los rayos del sol, generalmente mediante espejos, para conseguir temperaturas suficientemente altas que permitan evaporar un fluido y dotarlo de una energía de expansión con el fin de hacer rotar los álabes de una turbina y así generar energía mecánica que, a través de un generador eléctrico, produzca energía eléctrica [19] [20]. Aunque la principal aplicación de los diferentes sistemas de concentración solar es la generación de energía eléctrica, de manera similar a una termoeléctrica convencional “basada en la conversión mecánica del calor y posteriormente la generación eléctrica en un alternador a partir de un movimiento mecánico rotativo” [21]; para integración a red eléctrica, es posible emplear la energía concentrada en procesos industriales termodinámicos, o como se verá más adelante es posible aprovecharla en la producción de hidrógeno para el almacenamiento, transporte y posterior aprovechamiento de la energía generada. Dicha producción se da principalmente mediante ciclos termoquímicos.

Las cuatro tecnologías más consolidadas para la concentración solar, están comprendidas por los sistemas de tipo linear, como los colectores cilindro parabólicos(1), y los sistemas Fresnel (2), sistemas de receptor central a torre (3) y los discos parabólicos con turbina o discos Stirling (4) [22]. En las figuras 6 a 12, se pueden observar las características diferenciadoras, puesto que hay varias condiciones de operación inherentes a todas las tecnologías, tal es el caso de la necesidad de un sistema de seguimiento solar que garantice la eficiencia en la captación del recurso solar.

Posterior al sistema de captación de energía solar concentrada, existen elementos comunes a todas las tecnologías cuando la aplicación final es la generación de energía eléctrica, un ejemplo de esto es el caso de las turbinas, los alternadores o los sistemas de almacenamiento térmico que emplean sales fundidas [23]. Es así como surge la oportunidad de integrar la producción de hidrógeno como un mecanismo para transportar la energía y aprovecharla en aplicaciones de otra índole.

Colombia dada su ubicación geográfica, tiene un alto potencial para la implementación de tecnologías que aprovechen la energía solar, puesto que el país cuenta con una radiación “promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m² (destacándose la península de la Guajira, con un valor promedio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquía con un valor un poco menor)” [31]. Con la certeza del recurso disponible, es necesario mencionar que la generación de energía a gran escala, a partir de fuentes como el sol, todavía no es económicamente viable en el país, por lo que las oportunidades están centradas en generación de energía eléctrica para Zonas No Interconectadas, o en aplicaciones en el sector agrícola e industrial; según lo establecido en la legislación más reciente.

3. Producción de hidrógeno empleando energía solar

En la actualidad, el hidrógeno se produce principalmente a partir de combustibles fósiles, con el fin de ser empleado en aplicaciones en diversos sectores como la industria química, el refino, la metalurgia, el vidrio o la electrónica. Los procesos

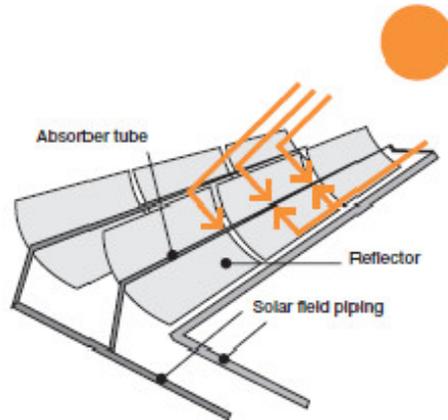


Figura 6. Colectores cilindro parabólicos. [26]. Concentra la radiación entre 30-80 veces. Potencia unitaria de 30 a 80 MW. Temperatura entre 200 y 400 °C.



Figura 7. Colectores cilindro parabólicos. [27]. Concentra la radiación entre 30-80 veces. Potencia unitaria de 30 a 80 MW. Temperatura entre 200 y 400 °C.



Figura 8. Colector lineal Fresnel [27]. Temperaturas entre 100 y 300 °C [28].

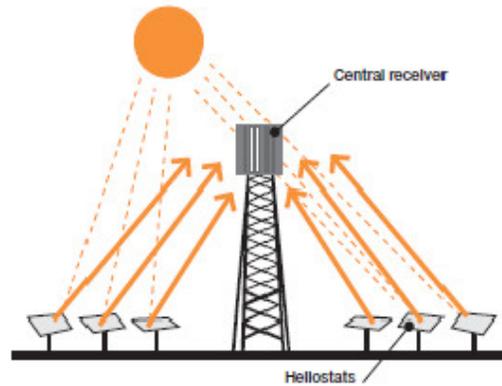


Figura 9. Sistemas de torre con recepción central [26]. Concentra la radiación entre 200-1000 veces. Potencias unitarias de 10 a 200 MW. Temperaturas alrededor de 1300 °C.



Figura 10. Sistemas de torre con recepción central [29]. Concentra la radiación entre 200-1000 veces. Potencias unitarias de 10 a 200 MW. Temperaturas alrededor de 1300 °C.

en los cuales se consume la mayor parte del hidrógeno producido hoy en día, son la síntesis del amoníaco, la hidrogenación en refinerías para obtener fracciones ligeras de crudo, el tratamiento del carbón, así como procesos de síntesis orgánica e inorgánica y en una escala más reducida, ha sido empleado como combustible en aplicaciones aeroespaciales [32].

La producción de hidrógeno con los métodos y tecnologías actuales, genera gases de efecto invernadero, favoreciendo negativamente el cambio climático, por esta razón y considerando que el hidrógeno es tan limpio como la fuente de energía que se emplee para producirlo, su integración a la cadena energética de las fuentes renovables de energía (figura 13), constituye una oportunidad altamente sostenible en sectores reconocidos por causar contaminación, como lo es caso del sector automotriz, y todas las aplicaciones móviles [33].

Con relación a las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar, se han desarrollado diversos métodos para producir hidrógeno, tal y como lo resume Montes en la figura 14. En esta, se pueden observar que las tres vías para su producción son fotoquímica, electroquímica y termoquímica. De estos

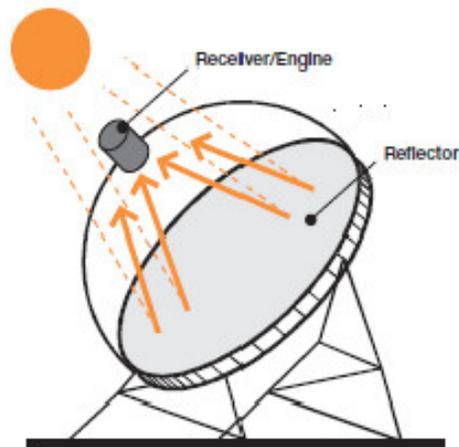


Figura 11. Discos parabólicos con motor Stirling [26]. Concentra la radiación entre 1000-4000 veces. Potencias unitarias de 5 a 25 MW. Temperaturas de hasta 1500 °C.



Figura 12. Discos parabólicos con motor Stirling [30]. Concentra la radiación entre 1000-4000 veces. Potencias unitarias de 5 a 25 MW. Temperaturas de hasta 1500 °C.

tres procesos, los que han tenido un mayor desarrollo técnico-económico, son los electroquímicos y los termoquímicos.

Los procesos electroquímicos consisten en emplear la energía eléctrica proveniente de un módulo fotovoltaico (figura 15), para alimentar un electrolizador, con el objetivo de fomentar una reacción no espontánea [36] y de esta forma obtener el hidrógeno por electrólisis del agua. También es posible emplear la energía eléctrica generada por un sistema de concentración solar para llevar a cabo electrólisis de alta temperatura, cuya ventaja es un menor requerimiento de energía eléctrica. La electrólisis, es el proceso principal de estos sistemas y consiste en la reacción electroquímica que separa la molécula del agua en hidrógeno y

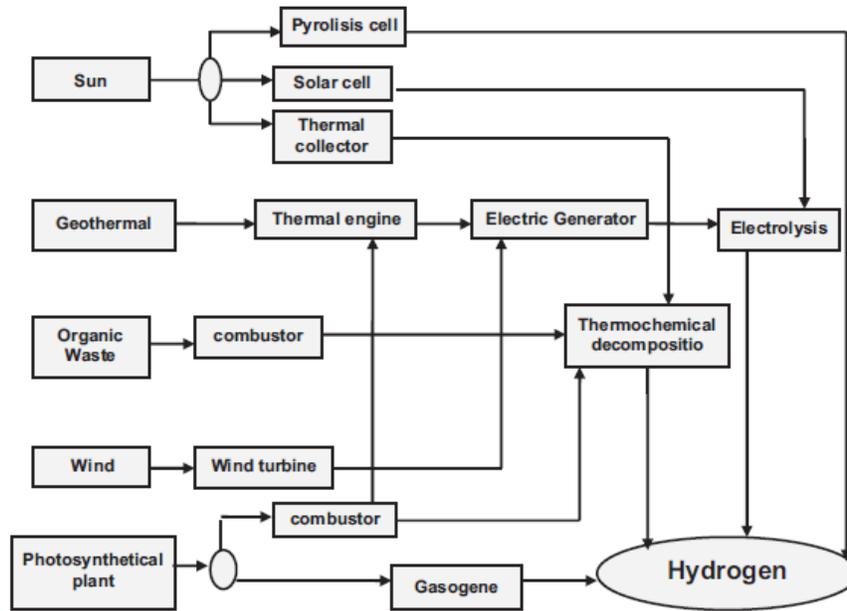


Figura 13. Técnicas para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables [34].

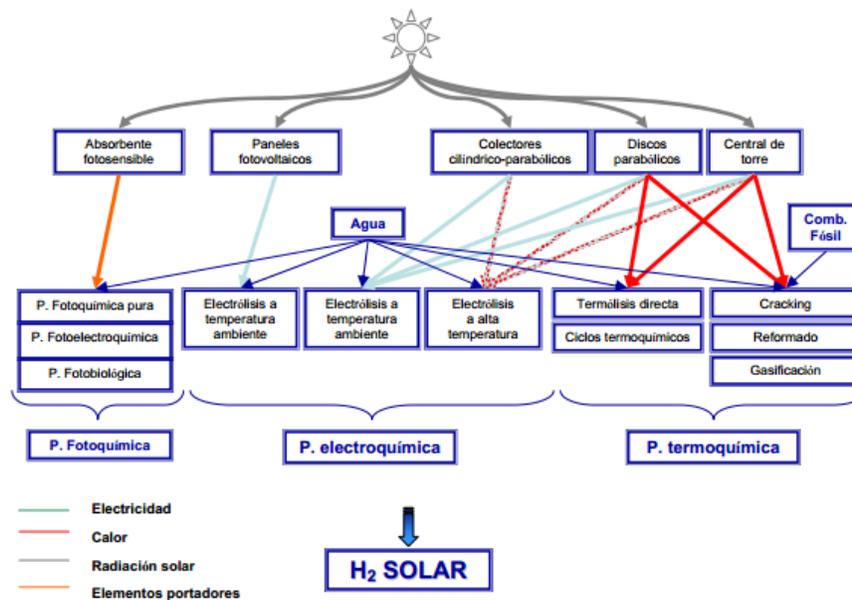


Figura 14. Producción de hidrógeno, empleando energía solar [35].

oxígeno, mediante la aplicación de un voltaje o corriente eléctrica generalmente de tipo continua que promueve las reacciones de óxido-reducción [37], [38].

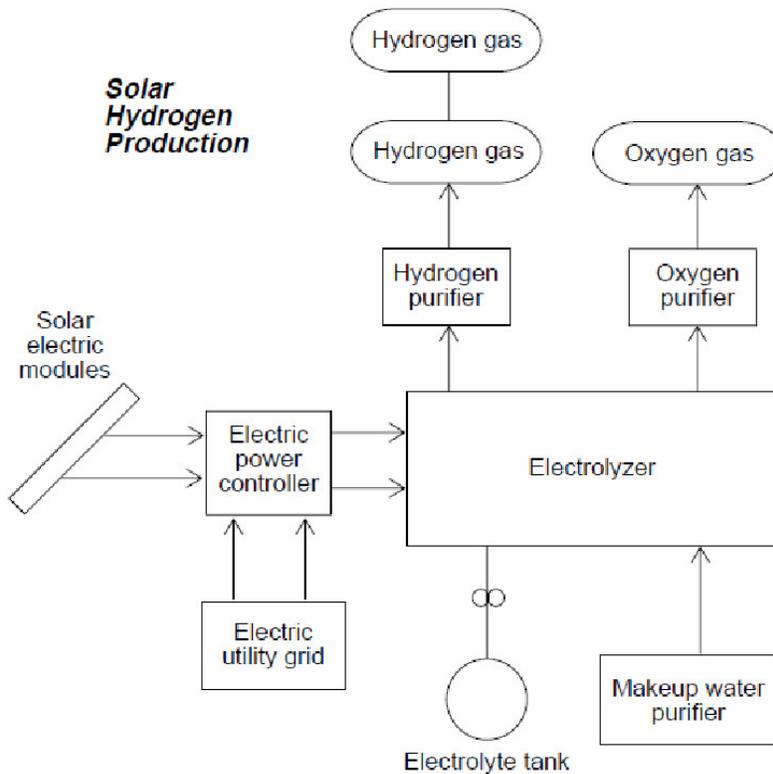


Figura 15. Producción de hidrógeno por electrolisis a partir de radiación solar [39].

El costo de la producción de hidrógeno mediante electrolisis a partir de energía solar fotovoltaica, es elevado, dado que la relación entre el volumen de hidrógeno generado, por superficie de sistemas fotovoltaicos de escala comercial, es baja. Por esta razón se continúa investigando en encontrar materiales para los electrodos que permitan aumentar el rendimiento de la electrolisis (realizándola a mayores temperaturas) como forma de disminuir los costos de producción y que en consecuencia, el proceso sea más competitivo y atractivo en el mercado.

Ahora bien, los procesos termoquímicos (figura 16) son aquellos que usan la energía solar como fuente de calor para producir reacciones químicas endotérmicas, tales como:

- Termólisis directa del agua: busca la disociación de la molécula de agua, utilizando energía solar, requiere temperaturas demasiado elevadas de alrededor de 2500 °C y la necesidad de poseer una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno formados, para evitar su mezcla explosiva, en consecuencia no existen proyectos a escala de planta piloto [40].

- Ciclos termoquímicos: descomposición del agua para obtener hidrógeno y oxígeno, mediante una serie de reacciones químicas endotérmicas y exotérmicas que constituyen ciclos compuestos de varias etapas. La mayor ventaja de este método es que el hidrógeno y el oxígeno se obtienen por separado (en etapas distintas) y no requiere temperaturas tan altas como en el caso de la termólisis directa. Sin embargo la existencia de varias etapas en estos ciclos, reduce el rendimiento total del proceso debido a la irreversibilidad asociada a cada una de las mismas [41].

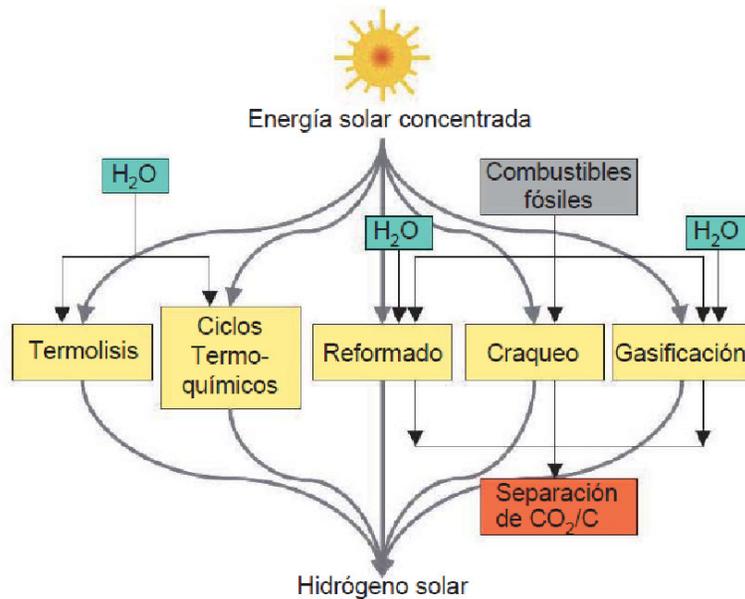


Figura 16. Procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno solar [42].

Estos procesos termoquímicos utilizan la radiación solar concentrada como fuente calorífica de alta temperatura para llevar a cabo reacciones endotérmicas. Para conseguir razones de concentración elevadas, se hace uso de dos de las tres configuraciones ópticas ya mencionadas: discos parabólicos y sistemas de torre, ya que con los colectores cilindro parabólicos no es posible alcanzar la temperatura requerida [35].

En la actualidad, se están adelantando diversas investigaciones con el fin de establecer ciclos termoquímicos que empleen menos etapas y, en consecuencia, sean más eficientes para ser implementados a gran escala porque los ciclos pueden consistir incluso de ocho reacciones que involucran hasta cinco elementos diferentes al hidrógeno y el oxígeno [43]. Los ciclos que emplean catalizadores basados en óxidos y en óxidos mixtos de diferentes metales de transición, al tener menor número de etapas, requerir temperaturas menos elevadas, una mayor eficiencia global del ciclo y permitir la recuperación del catalizador de forma más

sencilla; han sido los que mayor proyección han logrado, al punto que algunos de ellos han sido probados a escala de planta piloto, dentro de los que se destacan los óxidos de Zinc, de hierro, de manganeso y algunas ferritas. Dentro del amplio grupo de compuestos probados, los compuestos que más se han consolidado de acuerdo con diferentes publicaciones son el óxido de Cerio y la Ferrita de Níquel [44] [25] [45] [46].

Una vez sean establecidos los compuestos y ciclos más favorables en términos de eficiencia y rentabilidad económica, existen diversos proyectos de energía solar de concentración, tanto en Europa como en Estados Unidos, especialmente en el estado de California, que brindan la oportunidad de integrar la producción de hidrógeno rápidamente al proceso como una alternativa equiparable y posiblemente más eficiente que el almacenamiento en sales fundidas, que se emplea actualmente, para gestionar la energía generada [47].

El hidrógeno que es producido a partir de energía solar, debe ser captado y almacenado de manera tal que pueda ser empleado posteriormente en diferentes tipos de aplicaciones, principalmente móviles, es por eso que también se están adelantando numerosas investigaciones para establecer el método de almacenamiento más efectivo. Actualmente la tecnología más prometedora es el almacenamiento del hidrógeno en forma de hidruros metálicos que posteriormente puedan alimentar pilas de combustible, puesto que el almacenamiento en forma gaseosa, representa riesgos de seguridad y mayores requerimientos de volumen de gas, en comparación con sistemas que operan con gas natural. De igual forma se han desarrollado diferentes tecnologías para pilas de combustible tales como las membranas de intercambio protónico (PEM), para aplicaciones móviles de baja potencia y temperaturas de operación inferiores a 150 °C [48].

Es claro que los esfuerzos están concentrados en consolidar tecnologías en cada una de las etapas necesarias para que se consolide la economía del hidrógeno, del mismo modo que en el pasado se dio el establecimiento paulatino del modelo energético basado en los combustibles fósiles.

4. Perspectivas para le implementación de la producción de hidrógeno solar en Colombia

La implementación a nivel mundial de la producción de hidrógeno a partir de energías renovables en una escala comercial, está aún en etapa de maduración a nivel tecnológico y como modelo de negocio, pero sin duda alguna es una de las alternativas más interesantes y favorables para combatir el cambio climático y gestionar la energía proveniente de fuentes renovables. Esta es la razón por la cual se continúan llevando a cabo investigaciones serias, lideradas por entidades tales como el NREL (National Renewable Energy Laboratory), la IEA (International Energy Agency), cuyos resultados se espera ayuden a consolidar las diferentes etapas de la cadena de producción, almacenamiento y aprovechamiento del hidrógeno [49].

En Colombia, el hidrógeno es susceptible de ser incorporado a la cadena energética a través de los procesos que involucran la transformación de la energía

de la biomasa, como son la gasificación o la generación de hidrógeno a partir de microorganismos (algas o bacterias). Estos procesos presentan desventajas tales como el requerimiento de instalaciones de gran tamaño, así como procedimientos muy complejos para la captura y limpieza del hidrógeno [50], por lo que otra de las opciones viables e interesantes es emplear la energía solar en procesos electrolíticos y termoquímicos como los ya mencionados.

De acuerdo con lo anterior y dado el estado actual de desarrollo de cada una de las tecnologías, los procesos electrolíticos representan la oportunidad más clara para la producción de hidrógeno en un mediano plazo, especialmente en Zonas no Interconectadas, en donde es posible adelantar proyectos que impacten positivamente tanto en materia ambiental, como a nivel social.

Los beneficios que brindan este tipo de proyectos están claramente reconocidos por diversas entidades como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [51], quienes cuentan con programas de financiación y/o patrocinio para países en vía de desarrollo, como es el caso de Colombia. Es indudable entonces la importancia de implementar paulatinamente soluciones energéticas que aprovechen los recursos naturales renovables con los cuales cuenta el país, teniendo como primer escenario las zonas no interconectadas, con la finalidad de enriquecer y diversificar la oferta energética. Este panorama le permitirá a Colombia ser parte de los países líderes en el crecimiento sostenible.

Referencias

1. I. p. o. c. change, Climate change 2007: Synthesis report, de IPCC Plenary XXVII, Valencia, España, 2007.
2. C. Orbegozo y R. Arivilca, Energía solar fotovoltaica. Manual técnico para instalaciones domiciliarias, 2010. [En línea]. Available: http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_ES_Fotovoltaica.pdf.
3. J. A. R. Bermejo, Tesis doctoral: Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica de biomasa, Logroño (España): Universidad de la Rioja, 2013, p. 8.
4. C. J. Winter, R. L. Sizmann y L. L. Vant-Hull, Solar Power Plants. Fundamentals, Technology, Systems, Economics, Berlin: Springer-Verlag, 1991.
5. J. Rifkin, La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la tierra, Barcelona: Paidós, 2002.
6. R. R. G. N. K. G. Z Wang, Comparison of thermochemical, electrolytic, photoelectrolytic and photochemical solar-to-hydrogen production technologies, International journal of hydrogen energy, pp. 16287-16301, 2012.
7. K. Bennaceur, B. Clark, F. Orr, T. Ramakrishnan, C. Roulet y E. Stout, El hidrógeno, Un futuro portador energético?, 2005. [En línea]. Available: http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish05/sum05/p34_47.pdf. [último acceso: 11 2014].
8. W. Lubitz y B. Tumas, Hydrogen: An overview, American Chemical Society, Chemical Reviews, vol. 107, n 10, pp. 3900-3903, 2007.
9. B. Schmitt, Pilus Energy, Enero 2011. [En línea]. Available: <http://pilusenergy.com/blog/black-gold-and-white-diamonds/>.

10. I. Mitsubishi research institute, U. N. d. Colombia y N. A. Inc, Sustainable energy and biofuel strategies for Colombia. Preliminary Report, BID, Ministerio de minas y energía, Bogotá D.C., 2010.
11. XM Compañía de expertos en mercados S.A. E.S.P., XM, 2014. [En línea]. Available: <http://informesanuales.xm.com.co/2013/SitePages/operacion/2-4-Generaci%C3%B3n-del-SIN.aspx>.
12. A. Labouret y M. Viloz, Solar Photovoltaic Energy, Cuarta ed., Herts, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2010, p. 1.
13. SEDIGAS, Guía sobre aplicaciones de la energía solar térmica, España: Sedigas. Asociación española de del gas, 2013.
14. FOCER, Manuales sobre energía renovable. Solar térmica, San José de Costa Rica: FOCER Fortalecimiento de la capacidad de Energía renovable para América Central, 2002.
15. IDAE, José Manuel López-Cózar, Manuales de Energías renovables. Energía solar térmica, Madrid: IDAE, 2006.
16. O. P. Lamigueiro, Energía solar Fotovoltaica, Marzo 2013. [En línea].
17. G. M. Crawley y I. Rey-Stolle, The World Scientific Handbook of Energy, de The World Scientific Handbook of Energy, Singapore, World Scientific, 2013, p. 169.
18. ABB Group, Virtual Pro, 2011. [En línea]. Available: <http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/plantas-fotovoltaicas>.
19. J. González Velasco, Energías Renovables, de Energías Renovables, Barcelona, Reverte, 2009, p. 60.
20. S. Mishra y P. Tripathy, Solar Thermal electricity generating system, International Journal of advancements in research and technology, vol. 1, n 3, pp. 1-16, Agosto 2012.
21. Z. E. Romero M., Concentrating Solar Thermal Power., de Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2007.
22. F. Bernadelli y CEPAL, Energía solar termodinámica en América Latina: Los casos de Brasil, Chile o México, Naciones Unidas, Santiago de Chile, 2010.
23. O. P. Akinjiola y U. B. Balachandran, Concentrated Solar Thermal (CST) Systemfor Fuelwood Replacement and Household Water Sanitation in Developing Countries, Journal of Sustainable development, vol. 5, n 6, pp. 25-34, 2012.
24. M. Romero y S. R. V.-H. L. Winter C.J., Bio-nica, 2014. [En línea]. Available: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/RomeroEnergiaSolarTermoelectrica.pdf>.
25. T. Kodama y N. Gokon, Thermochemical cycles for high temperature solar hydrogen production, Chemical reviews, vol. 107, n 10, pp. 4048-4077, 2007.
26. Greenpeace, Solar Thermal Power 2020, 2003. [En línea]. Available: <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/solar-thermal-power-2020/>.
27. CIEMAT, CIEMAT, 2014. [En línea]. Available: <http://www.psa.es/webesp/instalaciones/parabolicos.php>.
28. J. A. Duffie y W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Hoboken, New Jersey: John Wiley & sons Inc., 2013.
29. CIEMAT, CIEMAT, 2014. [En línea]. Available: <http://www.psa.es/webesp/instalaciones/receptor.php>.
30. Mi energía gratis, 2014. [En línea]. Available: <http://www.mienergiagratis.com/noticias/n000013.html>.
31. UPME, Atlas de radiación solar de Colombia, UPME, Bogotá, 2005.

32. G. San Miguel, J. Dufour, J. A. Calles y J. A. Botas, Asociación Española de Científicos, [En línea]. Available: http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/documentos/LA_ECONOMIA_HIDROGENO_2.pdf.
33. UNEP, The hydrogen economy. A non technical review, UNEP, 2006.
34. S. Koumi Ngoh y D. Njomo, An overview of Hydrogen gas production from solar energy, Renewable and sustainable energy reviews, pp. 6782-6792, 2012.
35. M. J. Montes, A. Abánades y J. M. Martínez-Val, Energía sostenible, [En línea]. Available: <http://www.energiasostenible.net/DVD/H2solar.pdf>.
36. Fuel Cell Today, Fuel cell Today, Mayo 2013. [En línea]. Available: http://www.fuelcelltoday.com/media/1871508/water_electrolysis_renewable_energy_systems.pdf. [último acceso: 1 11 2014].
37. J. S. H. Sand, Electroquímica y análisis electroquímico, Madrid: Aguilar, 1952.
38. F. Scholtz, Teaching pH measurements with a student-Assembled combination Quinhydrone electrode, Journal of chemical education, vol. 82, n 5, 2005.
39. W. Pyle, J. Healy y R. Cortez, Solar Hydrogen Production by electrolysis, Home Power, vol. 39, pp. 32-38, 1994.
40. S. R. Fernández, Revisión bibliográfica sobre la producción de hidrógeno, Informes técnicos Ciemat, Madrid, 2007.
41. C. Perkins y A. W. Weimer, Likely near-term solar-thermal water splitting technologies, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 29, n 15, pp. 1587-1599, 2004.
42. A. Steinfeld, Solar thermochemical production of hydrogen—a review, Solar Energy, vol. 78, n 5, pp. 603-615, 2005.
43. J. E. Funk, Hydrogen production, 10th World Hydrogen Energy Conference, US, 1994.
44. S. Abanades y G. Flamant, Thermochemical hydrogen production from a two-step solar driven water-splitting cycle based on cerium oxides, Solar energy, vol. 80, n 12, p. 1611-1623, 2006.
45. K. Wegner y A. Steinfeld, In situ formation and hydrolysis of Zn nanoparticles for H₂ production by the two step ZnO/Zn water-splitting thermochemical cycle, International Journal Hydrogen Energy, vol. 31, n 1, p. 55-61, 2006.
46. F. Fresno, R. Fernández Saavedra, M. B. Gómez Mancebo, A. Vidal, M. Sánchez, M. I. Rucandio, A. Quejido y M. Romero, Solar hydrogen production by two-step thermochemical cycles: evaluation of the activityof commercial ferrites, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, n 7, p. 2918-2924, 2009.
47. European comission, Concentrating solar power from research to implementation, European Communities, Bélgica, 2007.
48. H. Abdel-Aal y E. El-Shenawy , Integration of Sustainable Energy Sources with hydrogen vector with case studies, Journal of Energy and power sources, vol. 1, n 3, pp. 147-151, 2014.
49. J. I. Levene, M. K. Mann, R. Margolis y A. Milbrandt, An Analysis of hydrogen production from renewable electricity sources, NREL (National renewable energ laboratory), Orlando, Florida, 2005.
50. European Commission, European Commission, 2003. [En línea]. Available: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hydrogen-report_en.pdf. [último acceso: 11 2014].
51. Banco Interamericano de Desarrollo, OLADE, Mayo 2010. [En línea]. Available: http://www.olade.org/electricidad/Documents/ponencias/Dia%2026%20de%20mayo/Sesion%202/Natacha_Marzolf_Mayo_2010.pdf. [último acceso: Noviembre 2014].