

Biocombustibles y producción de biohidrógeno

Manuel Garrido Romero

Resumen

El aumento de la población mundial, el hecho de que cada vez haya mayor dependencia hacia los productos producidos con petróleo y su desmedido uso provoca problemas medioambientales como el calentamiento global. Al ser un tema de preocupación mundial, se buscan nuevas fuentes que sean capaces de producir energía para reemplazar a los combustibles fósiles, en este sentido, se han desarrollado combustibles producidos por procesos biológicos o por biomasa de organismos vivos para tratar de reducir la huella de carbono y para mitigar los efectos producidos por el cambio climático. El hidrógeno producido por microorganismos o biohidrógeno presenta un gran potencial para ser usado como fuente de energía renovable ya que, a diferencia de las técnicas químicas para su obtención los microorganismos pueden usar fuentes de carbono renovables y energía solar como sustratos orgánicos.

Palabras Claves— Biocombustibles, algas, bioenergía, biohidrógeno, combustibles fósiles.

1. INTRODUCCIÓN

La población mundial está creciendo a ritmos acelerados y eso ha provocado un aumento dramático en la demanda global de energía. Actualmente la demanda de energía se cubre con los combustibles fósiles, a través de su combustión se produce energía que se convierte a electricidad liberando a la atmósfera una ingente cantidad de gases de efecto invernadero como el CO₂ o el NO₂, provocando efectos de calentamiento global [1]. Es por ello que muchos investigadores están centrando sus esfuerzos buscando alternativas sostenibles y económicas de energías renovables como son los biocombustibles [2]. Ejemplos de biocombustibles investigados y producidos actualmente son el bioetanol, biodiesel o el biohidrógeno producidos a partir de aceites vegetales y a partir de residuos de desecho.

El biohidrógeno, una de las fuentes de energía del futuro, tiene una serie de ventajas respecto a los combustibles fósiles usados habitualmente: alta eficiencia de conversión, reciclabilidad, naturaleza no contaminante y producción de alta cantidad de energía [3]. Para la producción de hidrógeno se han usado históricamente procesos químicos, pero a parte de ser muy caros, no proporcionan rendimientos muy elevados y son altamente contaminantes. En la última década se ha llevado a cabo su producción por medio de procesos fotosintéticos y fermentativos por algas, cianobacterias y bacterias anaeróbicas y es conocido como biohidrógeno. La producción de biohidrógeno necesita menos energía y puede ser realizada a temperatura y presión ambiente, lo que la hace idónea para la producción a largo plazo [4].

2. BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son productos químicos ricos en energía generados a través de procesos biológicos o derivados de biomasa de organismos vivos, como microalgas, plantas o bacterias. Los combustibles fósiles han sido usados como fuente principal de energía durante mucho tiempo; sin embargo, su uso es insostenible y son causantes de problemas medioambientales debido a su combustión [5].

Los métodos usados para la producción de biocombustibles por medio de microorganismos se basan principalmente en la conversión de energía solar a energía química gracias a la fotosíntesis. La fuente mejor conocida para producir biocombustibles son las plantas o las algas. El uso de organismos fotosintéticos como fuentes de biocombustibles es barata y plausible; por ejemplo, usan el CO₂ atmosférico como fuente de carbono y la luz solar como fuente de energía para su crecimiento y para la producción de biomasa [5,12].

Los biocombustibles se dividen en cuatro categorías o generaciones dependiendo de su origen y de las tecnologías empleadas en su producción: primera, segunda, tercera y cuarta generación.

2.1 BIOCOMBUSTIBLES DE PRIMERA GENERACIÓN

Los biocombustibles de primera generación provienen de fuentes como el almidón, azúcares, grasas animales o aceites vegetales y se producen a partir de fermentaciones, esterificaciones y digestiones [6]. Como ejemplos de biocombustibles de primera generación se encuentran el biodiesel o el biogás.

Las ventajas que presentan son la facilidad de procesamiento, sus bajas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero y un balance positivo en dichas emisiones, sin embargo, posee como desventaja principal el desvío de recursos alimenticios a la producción de recursos energéticos, además, de afectar directamente a la seguridad alimentaria [6,10].

2.2. BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN

Los biocombustibles de segunda generación se aprovechan de la biomasa que no se usa para producir alimentos, principalmente, celulosa. Para la producción de estos combustibles se emplean plantas que crecen específicamente para la producción de energía en áreas marginales y, además, se usan partes no comestibles de cultivos o árboles que pueden ser procesadas eficientemente para producir bioenergía. Como ejemplos de biocombustibles de segunda generación se encuentran el etanol, metanol o biodiesel [6,11].

La ventaja principal en la producción de estos biocombustibles reside en que no existe desviación de los cultivos usados para alimentación para la producción de bioenergía, sin embargo, su desventaja principal reside en una mayor contaminación debido a los procesos más laboriosos de producción en comparación con los de primera generación [8].

2.3. BIOCOMBUSTIBLES DE TERCERA GENERACIÓN

Los biocombustibles de tercera generación son producidos por algas y microalgas. Estas son organismos unicelulares microscópicos que se encuentran en ambientes marinos o de agua dulce. Las microalgas son más eficientes convirtiendo energía solar que las plantas superiores, ya que poseen un acceso más eficiente a agua, CO₂ y a otros nutrientes [7]. Han despertado la atención de los científicos debido a su elevado rendimiento y debido a la sencillez del proceso. En la siguiente tabla (Alam *et al.*, 2015) se muestra el rendimiento de obtención de biocombustibles en comparación con plantas usadas para obtener biocombustibles de primera y segunda generación [7], como se observa, las algas y microalgas son capaces de producir mayor cantidad de biocombustibles que algunas plantas superiores:

TABLA 1
RENDIMIENTOS DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Sustrato	Litro/Año
Soja	400
Girasol	800
Canola	1,600
Jathropa	2,000
Aceite de palma	6,000
Microalgas	60,000-240,000

Sin embargo, producir biomasa de microalgas es más caro en comparación con producir cultivos de plantas ya que se requiere luz, CO₂, agua, sales inorgánicas y reactores específicos para su crecimiento. Las algas crecen en determinados ecosistemas acuáticos, en agua dulce y salada o, por

ejemplo, en aguas residuales provenientes de la industria [7]. Dentro de los biocombustibles que podemos obtener de algas encontramos el biodiesel, butanol, gasolina, metano, etanol, aceites vegetales o queroseno, y estos poseen unos rendimientos muy elevados [8].

2.4. BIOCOMBUSTIBLES DE CUARTA GENERACIÓN

Los biocombustibles de cuarta generación se aprovechan de la biología sintética de algas y cianobacterias para la producción de bioenergía. La biología sintética abarca el diseño y la construcción de sistemas biológicos modificados genéticamente para darles un uso determinado. A diferencia de los otros tipos de biocombustibles, en este caso, los microorganismos realizan todo el proceso de producción, mientras que en las otras tres generaciones realizan parte del proceso de producción. Los biocombustibles de cuarta generación están basados en materias primas renovables, baratas y ampliamente disponibles [8].

Dentro de las algas modificadas genéticamente se pretende mejorar su eficiencia fotosintética, mejorar la penetración de luz y reducir la fotoinhibición. Además, la ingeniería metabólica de las microalgas puede llevar a un aumento significativo en su contenido de lípidos o carbohidratos, provocando que aumente el rendimiento de producción de biocombustibles [9].

El problema de las algas modificadas genéticamente es el riesgo de liberación deseada o no deseada de cepas transgénicas al medio ambiente. El hecho de que existan legislaciones tan extensas y estrictas sobre organismos modificados genéticamente hace que esta forma de obtención de biocombustibles no sea la más empleada, sobre todo en Europa [9].

3. PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO

La producción de hidrógeno molecular por microorganismos fotosintéticos es una de las aplicaciones más prometedoras a la hora de generar energías renovables. El proceso ocurre a temperatura ambiente y requiere luz solar, agua y una mínima cantidad de macro- y micronutrientes. Es un proceso que no posee emisiones al medioambiente de gases de efecto invernadero y de otros contaminantes ambientales. El biohidrógeno puede ser usado directamente en motores de combustión interna o también pueden ser usados para pilas de combustibles para la producción de electricidad [10].

Sin embargo, esta tecnología posee bajo rendimiento y baja eficiencia. La enzima que cataliza la producción de biohidrógeno es la hidrogenasa, una enzima muy sensible al O₂, un producto liberado en la fotosíntesis, capaz de inhibir la acción de esta enzima. Otra desventaja es que esta producción no puede competir con los precios de la producción de hidrógeno por medio de combustibles fósiles [11].

Pese a ello, se están realizando numerosos esfuerzos para producir hidrógeno por medio de microorganismos ya que se pueden alcanzar eficiencias muy altas y, a medida que se vayan optimizando los métodos, va a competir de forma directa con la obtención de hidrógeno por medio de combustibles fósiles [11].

3.1 PRODUCCIÓN DE H₂ POR FOTOFERMENTACIÓN

Este método se basa en la capacidad de bacterias fotosintéticas anaeróbicas de convertir moléculas orgánicas a biohidrógeno en presencia de luz. Estas reacciones están catalizadas por hidrogenasas de nitrógeno o nitrogenasas, enzimas muy sensibles a la presencia de oxígeno ya que las inactiva. *Rhodobacter*, *Rhodospseudomonas* y *Rhodospirillum* son ejemplos de bacterias no sulfurosas púrpuras usadas en esta ruta de producción de biohidrógeno [14].

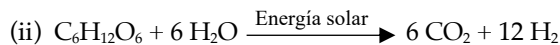
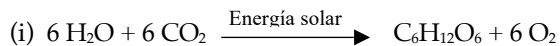
Las bacterias púrpuras no sulfuradas son capaces de capturar la energía solar para producir ATP y electrones, después, a través de un flujo inverso de protones son capaces de reducir la ferredoxina. Entonces, gracias al ATP y a la ferredoxina reducida se lleva a cabo la reducción de protones a hidrógeno por medio de la nitrogenasa [20].

3.2 PRODUCCIÓN DE H₂ MEDIANTE BIOFOTÓLISIS DIRECTA E INDIRECTA

El concepto fundamental de la biofotólisis es usar microorganismos como catalizadores para convertir energía solar y agua a hidrógeno y oxígeno. Esta reacción se lleva a cabo gracias a las hidrogenasas de hierro, a través de las cuales los microorganismos usan protones para producir biohidrógeno [14].

La **biofotólisis directa** es llevada a cabo por algas verdes y por cianobacterias, en un proceso que implica la disociación del agua por la incidencia de energía solar. Los fotosistemas presentes en los cloroplastos de algas verdes pueden absorber energía solar y convertirla en energía redox en forma de protones. Después, las hidrogenasas presentes en el cloroplasto catalizan la reducción de los protones para generar hidrógeno molecular (H₂). Uno de los inconvenientes de esta técnica es la alta sensibilidad de las hidrogenasas al oxígeno generado en la fotosíntesis, provocando una baja conversión lumínica en biohidrógeno. Otra desventaja es la producción de H₂O₂ como subproducto, un compuesto altamente explosivo [15].

La **biofotólisis indirecta** incluye dos fases: la energía solar se convierte en energía química en forma de carbohidratos, que son usados como sustratos en la fermentación anaeróbica (i), después, los carbohidratos son convertidos a biohidrógeno por medio de la acción de hidrogenasas en procesos de fermentación anaeróbica (ii). En este método se evita la sensibilidad de la hidrogenasa al O₂ al separar las reacciones en el tiempo y en el espacio, en dos bioreactores diferentes. En las siguientes reacciones se esquematizan las dos fases de la biofotólisis indirecta [16,17]:



3.3 PRODUCCIÓN POR FERMENTACIÓN OSCURA

El proceso se basa en la habilidad de ciertos microorganismos anaeróbicos o microalgas para generar biohidrógeno en ausencia de luz solar. El mecanismo principal consiste en convertir biomasa orgánica a biohidrógeno a través de procesos de fermentación de ciertos microorganismos. Primeramente, los compuestos orgánicos se hidrolizan para, mediante una acidogénesis, producir ácidos grasos. Estos ácidos grasos serán convertidos a biohidrógeno y acetato por medio de un proceso denominado acetogénesis [18].

La fermentación oscura no requiere luz y produce mucha más energía en comparación con los otros métodos, sin embargo, posee una serie de limitaciones, que se encuentran actualmente en investigación; por ejemplo, una vez obtenido biohidrógeno en la acetogénesis, puede usarse para producir metano y dióxido de carbono en un proceso denominado metanogénesis, algo totalmente indeseado, por ello, se están realizando esfuerzos para tratar de almacenar el H₂ producido para reprimir la metanogénesis [19].

4. PROBLEMAS ACTUALES EN LA PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO

Maximizar la eficiencia de producción de hidrógeno es el mayor reto para las industrias productoras de biohidrógeno. Actualmente, la producción de hidrógeno en el mundo es baja debido a complicaciones en su uso, almacenamiento, distribución, transporte y debido a sus elevados costes de producción. Por ello, es necesario mejorar los procesos de producción para que aumente la cantidad de biohidrógeno producido anualmente [21].

El efecto inhibitorio del oxígeno sobre las hidrogenasas, enzimas clave para producir biohidrógeno, es el mayor problema a la hora de producir este gas por medio de procesos fermentativos. La adición de absorbentes de oxígeno, como la enzima glucosa oxidasa, ha sido usado como solución a este problema y los resultados han sido positivos [22]. A parte de este problema, el bajo rendimiento en la producción de hidrógeno y la necesidad de biorreactores muy caros son los mayores factores limitantes para la producción a larga escala de biohidrógeno por biofotólisis [23]. Sin embargo, las principales limitaciones a la hora de producir biohidrógeno son su purificación y su almacenamiento.

Para su purificación se requieren una serie de pasos que comprenden cambios de temperatura y presión bruscos. Hasta el momento las técnicas de purificación de biohidrógeno son poco efectivas y no aseguran una corriente de hidrógeno totalmente puro [24]. El hidrógeno puede ser almacenado químicamente dentro de soluciones acuosas o sólidas, a través de una compresión y una posterior

licuefacción. Las técnicas usadas para su almacenamiento tienen que ser muy seguras ya que el hidrógeno puede provocar explosiones en su reactor de almacenamiento, debido a que en su producción pueden generarse mezclas de H_2O_2 [24].

5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA

En mi opinión, los biocombustibles son un excelente ejemplo de energía renovable respetuosa con el medio ambiente, se sirven de los organismos vivos y ayudarán a reducir la clara dependencia a los combustibles fósiles a medida que vayan desarrollándose métodos eficientes, más baratos y menos dañinos para su producción. Gracias a la ingeniería genética y a la mejora de los procesos de producción van a ser capaces de plantar cara a los combustibles fósiles, para, en un futuro ser usados ayudando a mitigar los efectos producidos por el cambio climático y reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero.

La producción de hidrógeno por medio de procesos biológicos ejemplifica a la perfección un área prometedora en la producción de bioenergía, además, es una alternativa real al uso de los combustibles fósiles, pese a que se encuentre en investigación actual, ya que los métodos de producción no son del todo efectivos, económicos y no son del todo aplicables a gran escala. El método que destaca de los otros dos es el de fermentación oscura, ya que es el método que produce más energía debido a la fermentación de biomasa como azúcares y carbohidratos, sin embargo, posee muchas desventajas que la hacen inviable. Pese a ello, de acorde a la literatura, no se ha desarrollado todavía ningún proceso espaciado que aplique fotofermentación en una fase y fermentación oscura en otra, pudiendo ser este un método más eficiente y con menores limitaciones.

En mi opinión se deben realizar más esfuerzos para la producción de biohidrógeno. Actualmente, la mayoría de los métodos están basados en procesos de fotosíntesis, sin embargo, un método que puede ser muy eficaz de cara al futuro es la aplicación de ingeniería metabólica para la producción de H_2 . Desde mi punto de vista, analizando la literatura actual no se están realizando los suficientes esfuerzos para dirigir determinadas rutas de microorganismos hacia la producción de hidrógeno, por lo que podría ser una perspectiva futura aplicable a la producción de bioenergía.

5. REFERENCIAS

- [1] Hood, E. E. (2016). Plant-based biofuels. In *F1000Research* (Vol. 5). Faculty of 1000 Ltd. <https://doi.org/10.12688/f1000research.7418.1>
- [2] Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R. T., Haines, A., & Ramanathan, V. (2019). Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(15), 7192–7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
- [3] Perera KRJ, Ketheesan B, Gadhamshetty V, Nirmalakhandan N. Fermentative biohydrogen production: evaluation of net energy gain. *Int J Hydrog Energy*. 2010;35:12224–12233.
- [4] Sanjay Kumar Gupta, Sheena Kumari, Karen Reddy & Faizal Bux (2013) Trends in biohydrogen production: major challenges and state-of-the-art developments, *Environmental Technology*, 34:13-14, 1653-1670, DOI: 10.1080/09593330.2013.822022
- [5] Abdullah, B., Syed Muhammad, S. A. F. ad, Shokravi, Z., Ismail, S., Kassim, K. A., Mahmood, A. N., & Aziz, M. M. A. (2019). Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 107, pp.37–50). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.018>
- [6] Lee, R. A., & Lavoie, J.-M. (2013). From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers*, 3(2), 6–11. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0010>
- [7] Alam, F., Mobin, S., & Chowdhury, H. (2015). Third generation biofuel from Algae. *Procedia Engineering*, 105, 763–768. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.068>
- [8] Madden, M. C. (2016). A paler shade of green? The toxicology of biodiesel emissions: Recent findings from studies with this alternative fuel. In *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects* (Vol. 1860, Issue 12, pp. 2856–2862). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2016.05.035>
- [9] Moravvej, Z., Makarem, M. A., & Rahimpour, M. R. (2019). The fourth generation of biofuel. In *Second and Third Generation of Feedstocks: The Evolution of Biofuels* (pp. 557–597). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815162-4.00020-3>
- [10] Naik, S. N., Goud, V. v., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first- and second-generation biofuels: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 2, pp. 578–597). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- [11] Uthoff, S., Bröker, D., & Steinbüchel, A. (2009). Current state and perspectives of producing biodiesel-like compounds by biotechnology. In *Microbial Biotechnology* (Vol. 2, Issue 5, pp. 551–565). <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00139.x>
- [12] Rodionova, M. v., Poudyal, R. S., Tiwari, I., Voloshin, R. A., Zharmukhamedov, S. K., Nam, H. G., Zayadan, B. K., Bruce, B. D., Hou, H. J. M., & Allakhverdiev, S. I. (2017). Biofuel production: Challenges and opportunities. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 42, Issue 12, pp. 8450–8461). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.125>
- [13] Lee, D. J., Show, K. Y., & Su, A. (2011). Dark fermentation on biohydrogen production: Pure culture. *Bioresource Technology*, 102(18),8393–8402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.041>
- [14] Kumar Gupta, S., Kumari, S., Reddy, K., & Bux, F. (2013). Trends in biohydrogen production: Major challenges and state-of-the-art developments. *Environmental Technology* (United Kingdom), 34(13–14), 1653–1670. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.822022>
- [15] Tamburic, B., Dechatiwongse, P., Zemichael, F. W., Maitland, G. C., & Hellgardt, K. (2013). Process and reactor design for biophotolytic hydrogen production. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(26), 10783–10794. <https://doi.org/10.1039/c3cp51866c>
- [16] Levin DB, Pitt L, Love M. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *Int J Hydrog Energy*. 2004;29:173–185.
- [17] Alstrum-Acevedo JH, Brennaman MK, Meyer TJ. Chemical approaches to artificial photosynthesis. *Inorg Chem*.

- [18] Zhang, Z. P., Show, K. Y., Tay, J. H., Liang, D. T., Lee, D. J., & Jiang, W. J. (2006). Effect of hydraulic retention time on biohydrogen production and anaerobic microbial community. *Process Biochemistry*, 41(10), 2118–2123. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.05.021>
- [19] Logan, B. E., Oh, S.-E., Kim, I. S., & Van Ginkel, S. (2002). Biological Hydrogen Production Measured
- [20] in Batch Anaerobic Respirometers. *Environmental Science & Technology*, 36(11), 2530–2535. <https://doi.org/10.1021/es015783i>
- [21] Ghimire, A., Frunzo, L., Pirozzi, F., Trably, E., Escudie, R., Lens, P. N. L., & Esposito, G. (2015). A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. In *Applied Energy* (Vol. 144, pp. 73–95). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.045>
- [22] Strahan D. The end of the road for hydrogen; 2008. Available from: www.davidstrahan.com/blog/?p=173
- [23] Pandu K, Joseph S. Comparisons and limitations of biohydrogen production processes: a review. *Int J Adv Eng Technol*. 2012;2:342–356
- [24] Sanjay Kumar Gupta , Sheena Kumari , Karen Reddy & Faizal Bux (2013) Trends in biohydrogen production: major challenges and state-of-the-art developments, *Environmental Technology*, 34:13-14, 1653-1670, DOI: 10.1080/09593330.2013.822022
- [25] Kruse O, Rupprecht J, Bader KP, Thomas-Hall S, Schenk PM, Finazzi G. Improved photobiological H₂ production in engineered green algal cells. *J Biol Chem*. 2005;280:34170–34177.



Manuel Garrido Romero, estudiante del máster de Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria de la Universidad Pablo de Olavide.