

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN REACTORES BIOELECTROQUÍMICOS DE ASISTENCIA MICROBIAL (BEAMR)



AUTOR

Fabián Ricardo Ortiz Rodríguez

TUTOR

I.Q. M.Sc. Dr.Sc. Andrés Felipe Suárez

**UNIVERSIDAD LIBRE – MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS RENOVABLES Y ALTERNATIVAS**

Bogotá D.C., enero 2019

Dedicado a la mujer que ha apoyado este sueño desde siempre, ha sido mi bastón en los momentos más difíciles y cuyas lágrimas fueron la mejor forma de demostrarme su amor... mi esposa, mi amada Flor María. A mis pequeñas María Helena y Ana Lucía por quienes hice el último esfuerzo para alcanzar esta meta, quienes con su sonrisa daban día a día la fuerza que necesité para alcanzar este sueño que ahora se convierte en realidad... Las amo con todo mi ser y este logró es también de ustedes mis amadas mujeres...

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	- 8 -
ABSTRACT	- 9 -
PROBLEMA	- 10 -
JUSTIFICACIÓN	- 12 -
OBJETIVOS.....	- 13 -
OBJETIVO GENERAL:	- 13 -
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	- 13 -
ANTECEDENTES.....	- 14 -
MARCO TEÓRICO	- 17 -
METODOLOGÍA.....	- 21 -
RESULTADOS Y ANÁLISIS	- 24 -
1. Diseño y construcción del reactor BEAMR en acrílico	- 24 -
2. Diseño y construcción del reactor BEAMR en vidrio.....	- 27 -
2.1. Estudio de variables en la producción de hidrogeno en reactor BEAMR vidrio-	28
-	
2.2. Determinación del modelo cinético.....	- 31 -
2.3. Estudio de la eficiencia energética y otras propiedades medidas en la producción de hidrogeno para el reactor BEAMR vidrio	- 35 -
CONCLUSIONES.....	- 37 -
RECOMENDACIONES.....	- 38 -
BIBLIOGRAFÍA	- 39 -

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Bacteria anodofílica separando los electrones, el H ⁺ y el CO ₂ del electrolito y transfiriendo los electrones al ánodo (19).....	- 19 -
Figura 2. Funcionamiento del reactor BEAMR (36).	- 19 -
Figura 3. Reactor en acrílico.....	- 24 -
Figura 4. Electrodo de aluminio consumido después de la primera prueba.....	- 25 -
Figura 5. Reactor de acrílico dispuesto para una de las pruebas.....	- 26 -
Figura 6. Filtraciones entre las cámaras después de una de las pruebas.	- 27 -
Figura 7. Segundo modelo de reactor.	- 28 -
Figura 8. Resultado cromatográfico de la muestra.....	- 54 -

TABLA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Moles de hidrógeno producido contra el tiempo en la primera prueba.	- 29 -
Gráfico 2. Datos de la primera prueba graficados para la ecuación de Gomperz.....	- 31 -
Gráfico 3. Datos de la primera prueba graficados para el Modelo Pseudo primer orden. -	32
-	
Gráfico 4. Datos de la primera prueba graficados para el Modelo de Pseudo segundo orden.	- 33 -

TABLAS

Tabla 1. Pruebas realizadas con sus correspondientes concentraciones de azúcar, los electrodos utilizados y el voltaje promedio.	- 29 -
Tabla 2. Ecuaciones resultantes de las pruebas llevadas a cabo con su respectivo coeficiente de determinación.....	- 30 -
Tabla 3. Coeficientes de la ecuación de Gompertz, para los moles en primera prueba y el R^2 correspondiente a los datos.....	- 31 -
Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos para R^2 con los diferentes modelos.	- 34 -
-	
Tabla 5. Resultados obtenidos para el H máximo, en las ecuaciones de Gompertz, Pseudo primer y Pseudo segundo orden en cada una de las pruebas.....	- 34 -
Tabla 6. Potencia promedio gastada en cada una de las pruebas y su equivalente energético.	- 35 -
Tabla 7. Energía que podría obtenerse con la masa de H_2 producida.	- 36 -
Tabla 8. Datos obtenidos para la conductividad y el pH en cada una de las pruebas al principio y al final de estas.	- 43 -
Tabla 9. Datos resultantes de la primera toma de datos.	- 44 -
Tabla 10. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la primera prueba, con su respectivo error y el R^2	- 44 -
Tabla 11. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la primera prueba, con su respectivo error y el R^2	- 44 -
Tabla 12. Datos resultantes de la segunda toma de datos.	- 45 -
Tabla 13. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la segunda prueba, con su respectivo error y el R^2	- 46 -
Tabla 14. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la segunda prueba, con su respectivo error y el R^2	- 46 -
Tabla 15. Datos resultantes de la tercera toma de datos.	- 47 -
Tabla 16. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la tercera prueba, con su respectivo error y el R^2	- 47 -
Tabla 17. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la tercera prueba, con su respectivo error y el R^2	- 47 -
Tabla 18. Datos resultantes de la cuarta toma de datos.	- 48 -
Tabla 19. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la cuarta prueba, con su respectivo error y el R^2	- 48 -

Tabla 20. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la cuarta prueba, con su respectivo error y el R^2	- 48 -
Tabla 21. Datos resultantes de la quinta toma de datos.	- 49 -
Tabla 22. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la quinta prueba, con su respectivo error y el R^2	- 49 -
Tabla 23. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la quinta prueba, con su respectivo error y el R^2	- 49 -
Tabla 24. Datos resultantes de la sexta toma de datos.	- 50 -
Tabla 25. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la sexta prueba, con su respectivo error y el R^2	- 51 -
Tabla 26. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la sexta prueba, con su respectivo error y el R^2	- 51 -
Tabla 27. Coeficientes de la ecuación de Pseudo primer orden, para los moles en primera prueba, con su respectivo error y el R^2	- 51 -
Tabla 28. Coeficientes para la ecuación de Pseudo segundo orden, para los moles en primera prueba, con su respectivo error y el R^2	- 51 -
Tabla 29. Especificaciones técnicas de la Membrana Intercambiadora de Iones.	- 53 -

RESUMEN

Dos modelos de reactor bioelectroquímico de asistencia microbiana BEAMR¹ fueron diseñados y evaluados para encontrar el método más efectivo para producir hidrógeno a partir de aguas residuales. Como insumo se empleó caña de azúcar, junto con levadura en la cámara anódica y una solución amortiguante en la cámara catódica. Los electrodos fueron hechos de aluminio, grafito y plata, encontrando que los mejores resultados aparecieron cuando se utilizó el electrodo de grafito en la cámara anódica y el electrodo de aluminio en la cámara catódica. El primer modelo, fabricado de acrílico, produjo 300 ml de gas aproximadamente en la cámara catódica en 24 horas, pero, rápidamente, mostró problemas relacionados con filtraciones de los líquidos entre las cámaras. El segundo modelo, fabricado en vidrio, resolvió el problema de las filtraciones y mostró un comportamiento estable en la producción de hidrógeno. Con este se hicieron seis series de experimentos, que mostraron que para altas concentraciones de azúcar en el agua residual, se produce más cantidad de hidrógeno. Los datos fueron utilizados para varios modelos cinéticos.

La energía producida por los reactores excede hasta ahora la energía requerida para el proceso bioelectroquímico, mostrando que este tipo de reactores podrían ser usados para una producción eficiente de hidrógeno.

¹ Reactor bioelectroquímico de asistencia microbiana, por sus siglas en inglés.

ABSTRACT

Two models of bioelectrochemical reactor of microbial assistance BEARM were designed and evaluated to find an effective method to produce hydrogen from residual waters. Sugar cane was employed as carbon source, using yeast into an anodic camera and a damping solution into a cathodic chamber. Electrodes were made from aluminum, graphite and silver, finding out that the best results appeared when a graphite electrode was utilized into the anodic chamber and another of aluminum was used into the cathodic camera. The first model, made of acrylic, produced 300 ml of gas approximately into the cathodic camera in 24 hours, but, quickly, it showed problems related to filtrations among the liquids of the cameras. The second model, made in glass, solved the problem of filtrations and showed a steady behavior for the production of hydrogen. With this one there were made six sets of experiments, which demonstrated that the higher is the concentration of sugar into the residual water, the more quantity of hydrogen is produced. Data were modeled by several kinetic models.

The energy produced by the reactors exceed so far the energy employed for the bioelectrochemical process, showing that this kind of reactors could be used for an efficient hydrogen production.

PROBLEMA

La lucha por la protección de nuestro hábitat ha revelado la necesidad de buscar fuentes de producción y obtención de energía más amables con el medio ambiente, fuentes que contribuyan a la conservación del entorno en vez de llevar a su destrucción, que es lo que se ha observado a lo largo de los años. La exploración en busca de la solución a este problema ha considerado diversas fuentes como el sol, el viento, las mareas, los volcanes, entre otras, de las cuales no se ha obtenido todo su potencial y desarrollo por las dificultades que ofrecen para su obtención o por lo costoso que lleva su implementación.

Dentro de las más prometedoras fuentes se encuentra el hidrógeno, debido a que está presente en toda la naturaleza aunque combinado con elementos como el oxígeno o el carbono. Dichas combinaciones representan una dificultad importante a la hora de manipular el hidrógeno puesto que las tecnologías aptas para su separación generan altos costos.

Sin embargo, se han obtenido algunos avances con respecto a su uso, los cuales han sido escasos (por la dificultad que representa llevarlo a la vida cotidiana) pero significativos. Estos van desde la creación de tecnologías -utilizadas principalmente en la industria automotriz- que aprovechan el hidrógeno como fuente de obtención de energía eléctrica a través de pilas elaboradas a partir de este elemento y de las que se obtiene como desecho simplemente agua, hasta su uso en la carrera espacial.

No obstante, este tipo de tecnología sigue fuera del alcance de la persona del común, haciendo que su batalla frente a los hidrocarburos continúe considerándose como perdida. Sin embargo, se han realizado esfuerzos por implementar tecnologías que empleen hidrógeno de manera que se logre una disminución en el consumo de hidrocarburos y de paso haya una menor emisión de gases contaminantes.

Por otro lado, el crecimiento desmedido de las ciudades, ha llevado a que la cantidad de desechos que son descargados a las fuentes hídricas, haya aumentado en gran medida al punto que, para el caso de Bogotá, por ejemplo, tenga uno de los ríos más contaminados

del mundo atravesándola, siendo este una fuente de constantes enfermedades para las personas y especies que habitan cerca de él.

Debido a estas situaciones surgió la pregunta: ¿es posible idear tecnologías que, usando aguas residuales, produzcan el hidrógeno suficiente para cubrir, de alguna manera, los requerimientos energéticos de una comunidad, obteniendo como único desecho agua?. Esta lleva a una investigación en torno a los avances relacionados con la producción de hidrógeno a partir del agua residual, continuando con la construcción de un prototipo, su adecuación y mejoramiento al punto de conseguir producir hidrógeno, con bajo costo energético, y que podría ser utilizado en celdas para la producción de energía eléctrica, cuyo único desecho sería agua.

JUSTIFICACIÓN

Por diversos factores económicos, sociales y culturales, Colombia ha tenido una gran explosión demográfica, sobre todo en las ciudades, lo que ha llevado a que estas crezcan de manera tal que las demandas energéticas hayan aumentado en igual o mayor proporción, lo que ha traído consigo una gran demanda de hidrocarburos y que los niveles de contaminación de las fuentes de agua y del aire, sean altos. En ciudades como Bogotá, el aumento desmedido de su población llevó a que tenga cruzando por ella, uno de los ríos más contaminados del mundo y en algunas ocasiones una gruesa capa de aire contaminado flotando sobre ella.

Estos problemas que no sólo afectan a la ciudad de Bogotá sino a muchas ciudades en el mundo, han llevado a buscar alternativas que los solucionen, en ese sentido surge el hidrógeno y su poder energético, ya que al ser usado en procesos de combustión genera energía y con un único desecho, agua, lo que ayudaría de igual manera en disminuir los niveles de contaminación de los afluentes en las ciudades.

El hidrógeno puede obtenerse por diferentes procesos como el reformado de vapor, la pirolisis y co-pirolisis, la electrolisis del agua, que son los procesos más conocidos y utilizados, al igual que por procesos biológicos como la biofotólisis, la fermentación oscura y los reactores BEAMR que utilizan las aguas residuales, a partir de procesos bioelectroquímicos (1, 2). En nuestro país la obtención del hidrógeno se centra en la gasificación de combustibles fósiles a alta temperatura y presión, claro está que también se está trabajando en procesos alternativos a partir del sol, el viento y la biomasa (2-5).

De estos procesos se escogió el proceso bioelectroquímico BEAMR, ya que, al utilizar aguas residuales para la producción del hidrógeno, ataca dos problemas: la producción de energía limpia, al utilizar el hidrógeno en celdas de combustible; y la descontaminación de las aguas, puesto que al utilizar el hidrógeno producido en las celdas y obtener energía el único desecho de esto es agua limpia.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Evaluar la producción de hidrógeno con reactores bioelectroquímicos de asistencia microbiana BEAMR utilizando aguas residuales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Establecer las condiciones, rangos y dimensiones de construcción del reactor.
- Evaluar las condiciones bajo las cuales funciona el reactor, empleando aguas residuales.
- Analizar los resultados obtenidos en los experimentos, que permitan su respectivo ajuste al modelo cinético apropiado.

ANTECEDENTES

Desde el momento mismo de su descubrimiento por parte de Henry Cavendish en 1766, en un experimento con ácidos y metales, el llamado aire inflamable, (Joseph Priestley – 1781) denominado Hidrógeno posteriormente (Lavoisier – 1783), ha mostrado todas sus potencialidades, incluida la producción de agua al reaccionar cuando se pone en contacto con el oxígeno (6).

Potencialidades, que lo llevaron a ser reconocido por su uso en el transporte de miles de personas en los renombrados globos zeppelin, popularidad que mermó significativamente cuando uno de estos, el Hindenburg, se accidentara el 3 de mayo de 1937, provocando la muerte de 35 de las 97 personas que iban a bordo (6). De la misma forma, se le empleó en la carrera armamentista de las potencias mundiales como gas constitutivo de bombas de destrucción masiva, convirtiéndolo en un elemento de poco uso en el cotidiano de las personas debido a su imagen de agente destructor.

Esta impresión se mantuvo en la mente de la humanidad hasta que, en los años 60 del siglo pasado, se usara en la carrera por la conquista del espacio, en la que, para la propulsión de los cohetes, se utilizaba un tanque lleno de hidrógeno que reaccionaba con el oxígeno contenido en otro tanque, produciendo la fuerza suficiente para sacar las naves espaciales de la Tierra y vencer su gravedad.

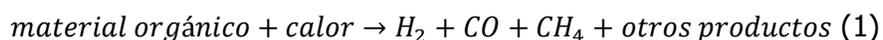
Otras formas de aplicar las propiedades del hidrógeno en el transporte, fue su aprovechamiento en la obtención de hidrocarburos. De igual manera, se le empleó para la elaboración de abonos (6) y pesticidas químicos que se usan en la producción de alimentos entre otros usos, lo cual, nuevamente le resta popularidad al mostrarlo como un agente que contribuye a la contaminación del ambiente.

En los últimos años, los esfuerzos por demostrar las bondades del hidrógeno se han retomado, al tomarlo como agente de producción de energías limpias, mediante la invención de pilas de hidrógeno, para la producción de energía eléctrica con agua como único desecho (6), lo que habla de la forma en que el hidrógeno ha sido, es y será usado. En cuanto a su

forma de producción existen varios métodos ambientalmente amigables, unos más que otros y con mayores o menores eficiencias también.

En ese sentido, el método más desarrollado en la actualidad se centra en la producción de hidrógeno por reformado con vapor, especialmente de gas natural. Este proceso es mundialmente el más utilizado, incluido nuestro país, ya que económicamente es el menos costoso con una eficiencia entre el 70 – 90%, la desventaja de este proceso es la alta producción de CO₂ cerca de 7.05 kg por 1 kg de hidrógeno producido y es muy costoso energéticamente hablando (1, 3, 6).

Otro de los métodos utilizados para la obtención de hidrógeno son la pirolisis (7) y la copirolysis. La primera toma material orgánico, que se calienta y desgasifica, en ausencia de oxígeno, a una temperatura entre 500 y 900°C y una presión entre 0.1 y 0.5 MPa. El proceso es descrito en la siguiente ecuación:



Donde los principales residuos son carbón puro e hidrógeno. En una pirolisis rápida los resultados de esta arrojan productos altamente energéticos y en todas las fases, en cuanto a la eficiencia de producción de hidrógeno esta alcanza hasta un 50%. Por otro lado la copirolysis, cuyo funcionamiento es similar al de la pirolisis, involucra carbón mezclado con residuos orgánicos, lo que aumenta la eficiencia de producción de hidrógeno a cerca de un 80% (1).

Uno de los métodos más conocidos es la electrólisis del agua, en el cual dos electrodos se introducen dentro de ella y por medio de una diferencia de potencial, aproximadamente de 1,23V (3, 8), la molécula de agua es dividida en hidrógeno y oxígeno. Este método arroja un balance energético negativo ya que se requieren 4 kW h/m³ de hidrógeno para separar la molécula y el contenido energético del hidrógeno producido es de 3 kW h/m³ de hidrógeno (9). Una variación de este método es el sistema de electrólisis SOSES², que logra la separación del agua con una eficiencia cercana al 90% (1, 6), el problema de este sistema son las altas temperaturas, entre 873 y 1273 K, que se manejan para lograr esos rendimientos y por lo tanto requiere grandes cantidades de energía (10).

En cuanto a la producción de hidrógeno por métodos biológicos, encontramos la biofotólisis (7, 11-13), la fermentación oscura y el método BEAMR entre otros. Estos procedimientos son ecológicamente aceptables por su bajo consumo de energía, al ser comparados con los métodos termoquímicos o electroquímicos.

La biofotólisis es un método que requiere grandes áreas para alcanzar una aceptable producción de hidrógeno, un ejemplo de este es el fotobioreactor en forma de toroide, que usa el alga *Platymonas Subcordiformis*, que funciona inicialmente a oscuras y finalmente

² Solid oxide steam electrolyzer system

con iluminación, esta producción aumenta con la cantidad de biomasa utilizada pero no alcanza altas eficiencias, cerca del 0,3 %, entre la producción de hidrógeno y la energía utilizada para su producción, lo que hace de este un método costoso y poco efectivo, además porque hay que hacer manipulación biológica de las algas (14).

La fermentación oscura usa bacterias anaerobias y cultivos ricos en azúcares a una temperatura entre 30 a 80°C. La materia prima utilizada es fácilmente degradable, barata y asequible en grandes cantidades y con altas cantidades de carbohidratos como la glucosa, la lactosa y la sacarosa. Este método tiene un rendimiento cercano al 80% de producción de hidrógeno, convirtiéndolo en uno de los más promisorios al ser comparado con los métodos tradicionales (1, 7, 9, 12-18).

La celda de electrólisis microbial (MEC³) también llamada reactor BEAMR (1, 13, 19), es un reactor microbial bioelectroquímicamente asistido de dos cámaras, una anódica y la otra catiónica (20-23), que utiliza la hidrogenación electroquímica para la transformación directa de material biológico en hidrógeno. Este método alcanza niveles de producción de hidrógeno de hasta 92% cuando se utiliza acetato (1, 7, 23, 24). Cuando se trabaja con agua residual su rendimiento es aún bajo, pero puede ser aumentado si se mejoran los métodos de captura de hidrógeno, los electrodos utilizados (16) y si se utilizan aguas residuales con lodos anaeróbicamente tratados (20, 21, 25, 26). Este método también reduce los niveles de DQO⁴ (22, 27, 28) y DBO⁵ del agua residual, convirtiéndolo en una alternativa para la recuperación de aguas contaminadas (11, 15, 19, 24, 29). Este método se convierte en una alternativa rentable de producción de hidrógeno basado en los requerimientos de energía eléctrica (26, 30).

³ Celda de electrólisis microbial por sus siglas en inglés.

⁴ Demanda química de oxígeno

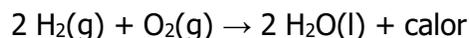
⁵ Demanda biológica de oxígeno

MARCO TEÓRICO

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo cerca del 92% de este. En nuestro planeta se encuentra en el agua, en la materia viva, en los compuestos orgánicos, en los combustibles fósiles y en pocas oportunidades en estado libre. Este se presenta en forma diatómica H_2 siendo el menos denso de los gases ($\rho = 8.99 \times 10^{-5} \text{ g / cm}^3$ a 0°C), es un gas inodoro, incoloro, insípido, inflamable y muy poco soluble en agua, lo que hace que su almacenamiento sea algo difícil y costoso, ya que tienen que usarse tanques presurizados, tanques criogénicos o hidruros metálicos (3).

En cuanto a los usos que se le han dado, este ha sido utilizado en el transporte de pasajeros en el famoso Zeppelin y tristemente en la carrera armamentista con la creación de la bomba de hidrógeno, lo que deja en el imaginario de las personas que este elemento es peligroso para ser manipulado. En la actualidad se usa mayormente en la industria química y de petróleo, en la producción de amoníaco, abonos, la hidrogenación de grasas y aceites, en la producción de metanol, como combustible para cohetes y como fuente de energía, entre otras (6).

Como portador de energía, tiene un poder calorífico de 120 MJ / kg (12, 29), lo que significa que 1 kg de hidrógeno equivale a 2.4 kg de metano o tener 2.75 veces más energía que los hidrocarburos (31). Su combustión genera únicamente agua como subproducto y calor:



y no óxidos de carbono como la combustión de los hidrocarburos, convirtiéndolo en el combustible del futuro (13).

La producción anual de hidrógeno es aproximadamente de 55 millones de toneladas con un incremento del 6% por año (1), de la cual el 40% es producido a partir del reformado de vapor de gas natural, 30% de combustibles pesados y nafta, 18% de carbón, 4% por electrólisis y 1% por biomasa (31), el 7% restante por otros métodos. En la actualidad este es usado en la obtención, de metanol, amoníaco, abonos y en la industria de la refinación.

Al ser uno de los elementos más abundantes en la naturaleza y con tan buen poder energético es importante aprovechar todas las formas de obtención de este, una de estas formas de obtención es el uso de un reactor BEAMR, que aprovecha las aguas residuales, bacterias anodofílicas y una diferencia de potencial para producirlo.

Este reactor BEAMR es un reactor bioelectroquímico de asistencia microbiana inventada por Bruce Logan, Stephen Grot, Thomas E. Mallouk y Hong Liu (32), este es una modificación de la celda de combustible microbiana MFC⁶ (19). Consiste en dos cámaras cada una con un electrodo de aluminio (7, 9, 15, 16, 29) (ánodo y cátodo) (20), ya que estos ofrecen los mejores rendimientos de producción de hidrógeno, en la separación de las cámaras se encuentra una membrana de intercambio protónico PEM⁷ (6) que permite únicamente el paso de los iones de hidrógeno H⁺ de la cámara anódica a la cámara catiónica. Esta membrana de intercambio está construida con polímero ionomérico, generalmente se utiliza un producto de DuPont conocido como Nafion (24, 33, 34), cuya principal característica es la conductividad de protones, su impermeabilidad al metano y su estabilidad térmica.

El reactor se alimenta con una mezcla de material orgánico oxidable, con niveles altos de DQO y DBO, como el que se encuentra en el agua residual. El DQO es definido como la cantidad de material orgánico oxidable por medios químicos en una muestra bajo condiciones controladas (19, 35). La cantidad de oxidante consumido es expresada en términos de oxígeno equivalente, miligramos de oxígeno di-atómico por litro (mgO₂/l).

En cuanto al DBO, esta habla de la demanda biológica de oxígeno. En otras palabras, la cantidad de oxígeno consumido por una población microbiana en aguas residuales, efluentes y aguas contaminadas. Su determinación se hace mediante una prueba empírica en el cual procedimientos estándar de laboratorio son usados para medir la cantidad de oxígeno utilizado durante un periodo específico de incubación para la degradación bioquímica de material orgánico y el oxígeno utilizado para oxidar material inorgánico como sulfuros y hierro ferroso (35). Este se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO₅) y se expresa en las mismas unidades en las que se mide el DQO.

Las poblaciones que se encuentran en las aguas residuales están compuesta por bacterias anodofílicas (24, 32) como la *geobacter sulfurreducens*, la *alteromonas sp.*, *Rhodoferrax educentis*, la *Pseudomonas spp.* y la *Shewanella spp.* (1, 8, 21, 36), que se incuban bajo condiciones de oxidación en las que liberan electrones y los transfieren al ánodo.

⁶ Celda de combustible microbiana, por sus siglas en inglés.

⁷ Membrana intercambiadora de protones, por sus siglas en inglés.

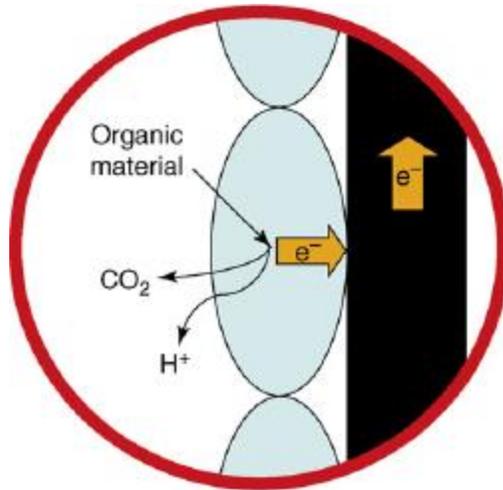


Figura 1. Bacteria anodofílica separando los electrones, el H⁺ y el CO₂ del electrolito y transfiriendo los electrones al ánodo (19).

Una fuente de poder se conecta a los electrodos, positivo al ánodo y negativo al cátodo, de manera que al generar una pequeña diferencia de potencial (24, 37), los electrones que liberan las bacterias al ánodo circulan hasta el cátodo, donde han sido atraídos los iones de H⁺ y se combinan para generar hidrógeno (H₂) en la cámara catiónica.

Las reacciones que ocurren en cada una de las cámaras es la siguiente:

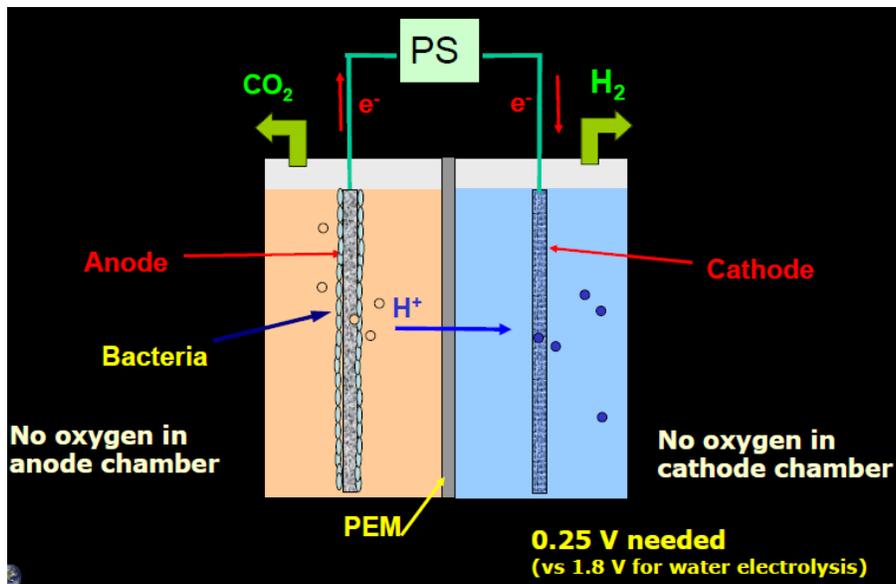
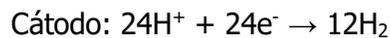
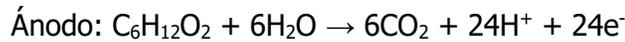


Figura 2. Funcionamiento del reactor BEAMR (36).

Lo anterior ocurre bajo condiciones de ausencia de oxígeno, para lograrlo se atomizan las muestras dentro de las cámaras con nitrógeno (8, 24, 38, 39), para luego ser selladas de manera que no salgan ni entren gases al reactor.

Dentro de la mezcla, con la que se alimentó el reactor, con el tiempo se van desarrollando metanógenos que consumen el hidrógeno producido, ocasionando que el rendimiento de producción baje considerablemente. La solución a este problema se da parando el reactor y sacando el cátodo de la muestra por cerca de 15 min ayudando al control y disminución de estos (8).

METODOLOGÍA

El proyecto desarrolló una metodología de tipo cuantitativo exploratorio, ya que evaluó la cantidad de hidrógeno producido a partir de agua residual preparada, al cambiar los electrodos, el voltaje y revisar su pH⁸ y conductividad al inicio y final de las pruebas, tal como aparece en los artículos de referencia (1, 9, 15, 16, 24, 25). La primera parte consistió en una revisión bibliográfica que nos ayudó a diseñar y construir el reactor.

Apoyado en esta revisión se construyeron dos reactores de tipo BEAMR, ya que este diseño ofrece los mejores rendimientos en la producción de hidrógeno, tanto en cantidad como en calidad (1, 24). El primero de ellos en acrílico, con dos cámaras rectangulares de volumen de 930 ml, cada una, en cuya parte central se ubicó un espacio para colocar la membrana intercambiadora de iones (6), que fue sellada de manera tal que el hidrógeno no se filtre por las uniones. Igualmente, en el cabezal de cada una de las cámaras se ubicaron las entradas de los cables de los electrodos y unas válvulas por donde circularan y cuantificaran los gases producidos en ellas (ver figura 3).

Posterior a la evaluación de este reactor, se probó un segundo reactor fabricado en vidrio que consta de dos cámaras gemelas entre las cuales va ubicada la membrana de intercambio iónico y los electrodos, uno a cada lado de esta. Las cámaras fueron fabricadas en vidrio borosilicato de 400 ml de volumen, y en cuyo cabezal se encontraban las válvulas por donde circulaban los gases producidos, por cada cámara, para ser cuantificados. Igualmente, en el cabezal de cada cámara, se encontraba el punto de conexión de los electrodos (ver figura 7).

En cuanto a la membrana intercambiadora de iones, se adquirió una lámina de 1.22 x 3.05m (AMI-7001S) de marca Membranes International Inc., con resistencia eléctrica cercana a los 40 Ωcm^2 y una de densidad de corriente máxima cercana a los 500 A/m² (ver anexo). De esta lámina se fueron tomando pequeñas membranas para las diferentes pruebas que, antes de ser utilizadas, debían ser sumergidas por 12 horas en una solución de agua y NaCl al 5%, para que se hidratara y expandiera.

⁸ Potencial de hidrógeno

En la cámara anódica se utilizó como materia orgánica oxidable una combinación de 10 g de azúcar de caña, 1 g de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) y 1 ml de sedimentos de azúcar de caña fermentada, por 500 ml de agua destilada. En la cámara catiónica se utilizó como solución amortiguadora una mezcla de 10.2 g de NaH_2PO_4 , 33.8 g de Na_2HPO_4 , 0.31 g de NH_4Cl y 0.13 g de KCl , por litro de agua destilada (8).

El gas producido fue medido por desplazamiento de agua en una probeta de 250 ml, la presencia de presencia de hidrógeno fue captada utilizando el detector (Crowcon Tetra 0 – 2000 ppm $\pm 2.0\%$) y se hizo un análisis de cromatografía a este utilizando el cromatógrafo de referencia "Thermo Scientific with thermal conductivity detector and packed column by Thermo Scientific TracePLOT TG-BOND Msieve 5A". En cuanto al voltaje y la corriente eléctrica fueron medidos utilizando un multímetro UNITEST Hexagon 340 ($\pm 0.08\% + 2d$), conectado a los electrodos a la salida del reactor. La corriente eléctrica fue medida conectando el cable que sale de la cámara catiónica a la entrada del multímetro en función de amperímetro, y cuya salida se encontraba conectada a la parte negativa del generador. Los macro y micronutrientes y la temperatura ambiente fueron constantes durante las pruebas. El pH de las soluciones era medido al iniciar la prueba y al terminar las pruebas, al igual que su conductividad.

Las pruebas se hicieron en un tiempo de 4 a 6 horas, en intervalos de 10 minutos. Los datos arrojados se analizaron en función de la cantidad de hidrógeno producido, el voltaje, La corriente eléctrica y el tiempo al que correspondía cada uno de estos. El volumen de hidrógeno producido fue reportado en moles y masa empleando la ecuación de los gases ideales. Estos sirvieron para realizar las gráficas de cantidad de moles versus tiempo, para diferentes medidas de voltaje.

Para calcular la energía que produciría el hidrógeno obtenido, se multiplicó la masa de este por su poder calorífico que es de 120 MJ / kg (12, 29). La eficiencia se calculó dividiendo esta energía entre la energía consumida en el proceso. Esta última se calculó a partir de los datos de corriente eléctrica, voltaje y tiempo para cada una de las pruebas.

En cuanto al modelo cinético para el cual se ajustan los datos encontrados se hizo la comparación de tres ecuaciones:

- Gompertz modificada (40-43):

$$H = H_{max} * \exp \left\{ -\exp \left(\frac{R_m * \exp(1)}{H_{max}} (\lambda - t) + 1 \right) \right\}$$

donde H_{max} es el valor máximo de producción de H_2 (mol), R_m es la tasa de producción máxima de H_2 (mol/h), λ es la fase de arranque para la producción de H_2 (h) y t el tiempo medido en el reactor (h).

- Pseudo primer orden en su forma lineal (44):

$$\log(H_{max} - H) = \log(H_{max}) - \frac{k_1 t}{2.303}$$

donde H_{max} es el valor máximo de producción de H_2 (mol), k_1 es la tasa de producción de hidrógeno (1/min) y t es el tiempo medido en el reactor (h).

- Pseudo segundo orden en su forma lineal (44):

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{k_2 H_{Max}^2 t} + \frac{1}{H_{max}}$$

donde H_{max} es el valor máximo de producción de H_2 (mol), k_1 es la tasa de producción de hidrógeno (1/(mol*min)) y t es el tiempo medido en el reactor (h).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

1. Diseño y construcción del reactor BEAMR en acrílico

El primer diseño se construyó con unas dimensiones de 15,5 x 12,5 x 12 cm en acrílico de espesor 0,4 cm. Para separar el reactor en dos partes iguales, se ubicó una pared con una ventana de 7,6 x 5,05 cm en la cual se instaló un dispositivo compuesto de dos partes, la primera de 7,6 x 5,05 x 0,66 cm y la segunda 8,82 x 6,6 x 0,66cm que se encajaban entre sí para colocar en medio de estas la membrana intercambiadora de iones del mismo tamaño de la ventana. Adicionalmente a la pared se le instalaron cuatro líneas de transporte de 3 cm, en donde se ubicaban otros separadores (color naranja), estos estaban compuestos de dos partes, la primera de 9,72 x 7,66 x 0,7 cm en cuya parte central se encaja la segunda parte, de 7,05 x 6,8 x 0,4 cm, para dejar los electrodos en medio de ellas, como se observa en la figura 3.

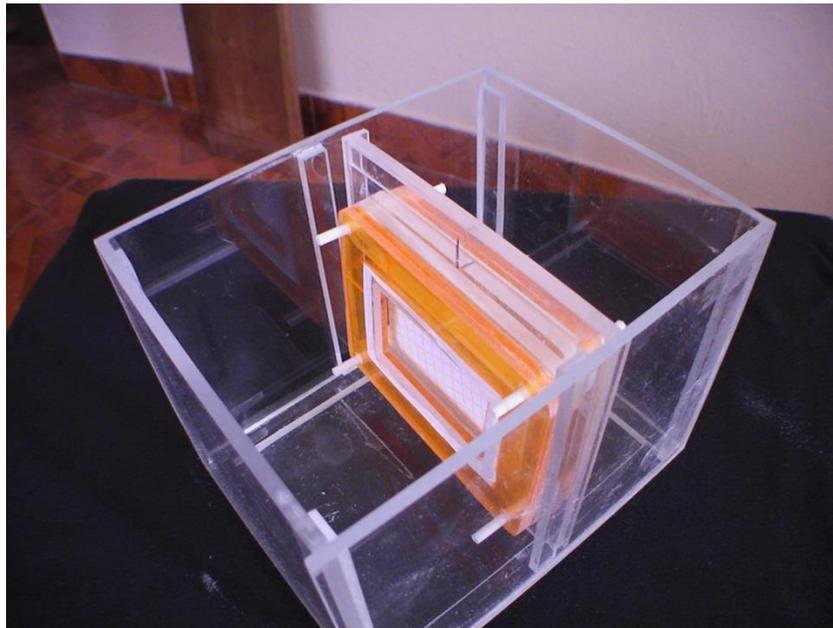


Figura 3. Reactor en acrílico.

En la primera prueba que se realizó, se emplearon electrodos de aluminio, ya que estos han demostrado las mayores eficiencias en la obtención de hidrógeno (16), pero la prueba finalizó debido a que el electrodo ubicado en la cámara anódica fue destruido por el electrolito, ya que el electrodo de aluminio en presencia de una diferencia de potencial libera iones de aluminio A(III) y electrones en la solución, el A(III) dentro de esta forman sales de aluminio tales como Al(OH)_3 (9, 15, 16), haciendo que el electrodo quede como se observa en la figura 4. Debido a esto se decidió cambiar este electrodo por uno de grafito para la cámara anódica y seguir con el de aluminio en la cámara catódica, ubicados muy cerca de la membrana, para evitar que los iones de hidrógeno se disuelvan en el electrolito (8, 22, 45).



Figura 4. Electrodo de aluminio consumido después de la primera prueba.

Los electrodos de 7 x 6,8 cm se unieron al generador de corriente continua a través de cables, el positivo al ánodo (rojo) y el negativo al cátodo (negro) (24). Se usó un voltímetro para registrar el voltaje entre el ánodo y el cátodo. Las cámaras se sellaron con una única tapa de 16,3 x 13,3 x 0,8 cm, hecha en acrílico que contenía las válvulas para la extracción de los gases producidos en ambas cámaras y para evitar que por los cabezales de estas cámaras pueda haber pérdidas de estos. Entre la tapa y el cuerpo del reactor se ubicó un caucho cuya finalidad era la de respaldar la tapa en evitar que los gases producidos se escapen. Igualmente, la tapa se fijaba al cuerpo de del reactor y al caucho en medio de ellos por medio de 8 tornillos, como se observa en la figura 5.

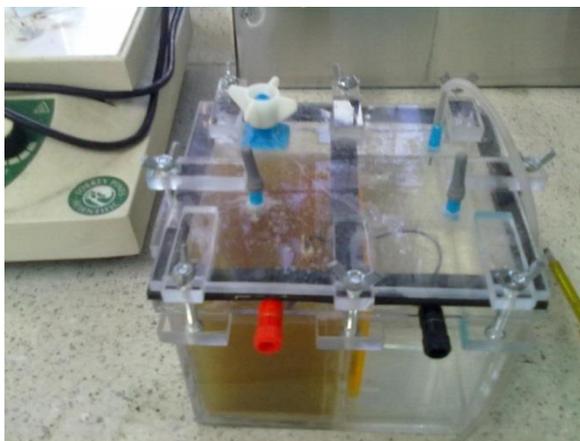


Figura 5. Reactor de acrílico dispuesto para una de las pruebas.

Esta configuración fue probada en una serie de experimentos, en los que se utilizó como solución en la cámara anódica la preparación de agua residual, hecha con azúcar de caña como se ve en la figura 5, y se determinó pH, conductividad, corriente y diferencia de potencial óptimos para la producción de hidrógeno.

La diferencia de potencial se varió para evaluar la producción de hidrógeno (8, 15, 17, 24, 25, 46), y la afectación que tienen las comunidades bacterianas (17), ya que algunas, ayudadas con la aparición de diferencias de potencial, aumentan la cantidad de hidrógeno que producen.

Después de algunas pruebas, en las cuales se dejaba el montaje funcionando por dos o tres días, con agitación y recubierto en aluminio para conseguir que se hiciera una fermentación oscura, se notó que la producción máxima de gas en la cámara catódica fue de 350 ml, en el mejor de los casos. Igualmente, utilizando el detector de hidrógeno se encontró que este superaba las 2000 partes por millón, que es el límite superior del sensor de dicho equipo, lo que indica que este gas tiene concentraciones de hidrógeno superiores a este valor.

Sin embargo, en las últimas pruebas, se presentaron problemas de filtración en el reactor. Al momento de hacer el desmonte, se encontró que las sustancias se habían mezclado y pasado de una de las cámaras a la otra, también se estaban saliendo del reactor por una de sus paredes, sumado a que la tapa del reactor había tomado una forma curva en el punto en el que se encontraba la pared de separación de las cámaras, presumiendo que hubo intercambio de los gases producidos en estas, ver figura 6.

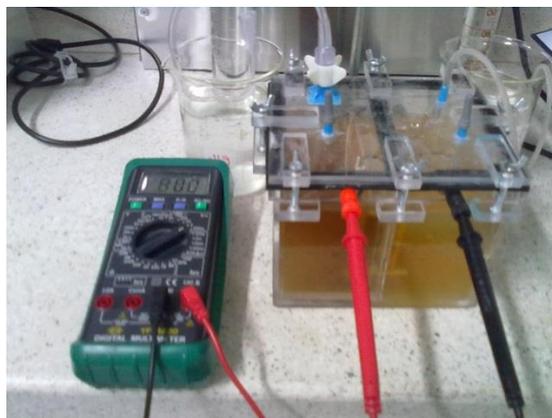


Figura 6. Filtraciones entre las cámaras después de una de las pruebas.

Al quitar la tapa del reactor se encontró también que la membrana de intercambio se había soltado, otra razón para la combinación de las sustancias. Razones por las cuales no se pudo hacer la medición del cambio de pH, conductividad y el efecto que las comunidades bacterianas tenían en la producción de hidrógeno. En cuanto al voltaje y la corriente, estos valores cambiaron muy poco.

2. Diseño y construcción del reactor BEAMR en vidrio

Estos eventos llevaron a que se tuviera que cambiar el diseño del reactor por uno en vidrio en el cual las cámaras estuvieran separadas y en cuyo punto de unión se ubicara la membrana de intercambio iónico. Cada cámara del reactor, de 400 ml de capacidad, consistió en una botella achatada para evitar que rodara. El punto de unión de las botellas fueron sus picos, a una de estas botellas, la que correspondió a la cámara anódica (izquierda), se le hizo una muesca en donde se ubicó la membrana y un anillo de silicona, que evitaba que esta se moviera. Las botellas, la membrana y el anillo de silicona eran unidos por una pinza (figura 7) que hacía la presión suficiente para que los líquidos, en el ánodo y en el cátodo, no se escaparan ni se combinaran como ocurría en el modelo de reactor anterior.



Figura 7. Segundo modelo de reactor.

En la parte superior de cada cámara se ubicaron las válvulas para la conectar las mangueras que permitieron la circulación de los gases producidos hasta las probetas de recolección y cuantificación de estos. También se ubicaron los puntos para la conexión de los electrodos a la fuente de poder, para ello se utilizó un cable en plata, recubierto para evitar que este tuviera mucha superficie de contacto con las sustancias y al cual se le podía adaptar el electrodo de mejor forma. Los electrodos de 2 cm^2 hechos en grafito y aluminio se ubicaron en la cámara anódica y catiónica respectivamente, de tal manera que estuvieran muy cerca de la membrana y así evitar que los iones se perdieran (8, 22, 45).

2.1. Estudio de variables en la producción de hidrogeno en reactor BEAMR vidrio

Con el montaje dispuesto se hicieron las pruebas correspondientes a filtraciones y fugas encontrando que no se presentó ninguna por las válvulas ni por las conexiones de los electrodos, por lo tanto, se procedió a realizar las pruebas, en las cuales se estableció la corriente eléctrica en 1 mA y un voltaje variable para garantizar esta corriente. Las dos primeras pruebas con la misma concentración de azúcar en el agua residual, las siguientes dos disminuyendo la cantidad de azucars y finalmente otras dos pruebas en las que se cambiaron los electrodos en el agua residual, en la primera se utilizó un electrodo de plata y en la segunda un electrodo de aluminio, manteniendo las concentraciones altas de azúcar. Como se muestra en la tabla 1. Adicionalmente se midieron variables como pH y conductividad, cuyos datos se muestran en el anexo 1.

Prueba	Concentración azúcar de caña (agua residual)	Electrodo ánodo (Agua residual)	Electrodo cátodo (solución amortiguadora)	Voltaje V
1	Alta[10g/500ml]	Grafito	Aluminio	1.477-1.487
2	Alta[10g/500ml]	Grafito	Aluminio	1.564-1.57
3	Baja[0g/500ml]	Grafito	Aluminio	1.638-1.641
4	Baja[0g/500ml]	Grafito	Aluminio	1.494-1.496
5	Alta[10g/500ml]	Plata	Aluminio	1.484-1.498
6	Alta[10g/500ml]	Aluminio	Aluminio	0.899-0.901

Tabla 1. Pruebas realizadas con sus correspondientes concentraciones de azúcar, los electrodos utilizados y el voltaje promedio.

Cada 10 minutos se tomaron los datos, pero las gráficas se realizaron promediándolos debido a que, para estos tiempos, el cambio en la cantidad de hidrógeno producido fue muy bajo. Así mismo estas cantidades de hidrógeno se llevaron a su equivalente en moles y representadas como se muestra en el gráfico 1.

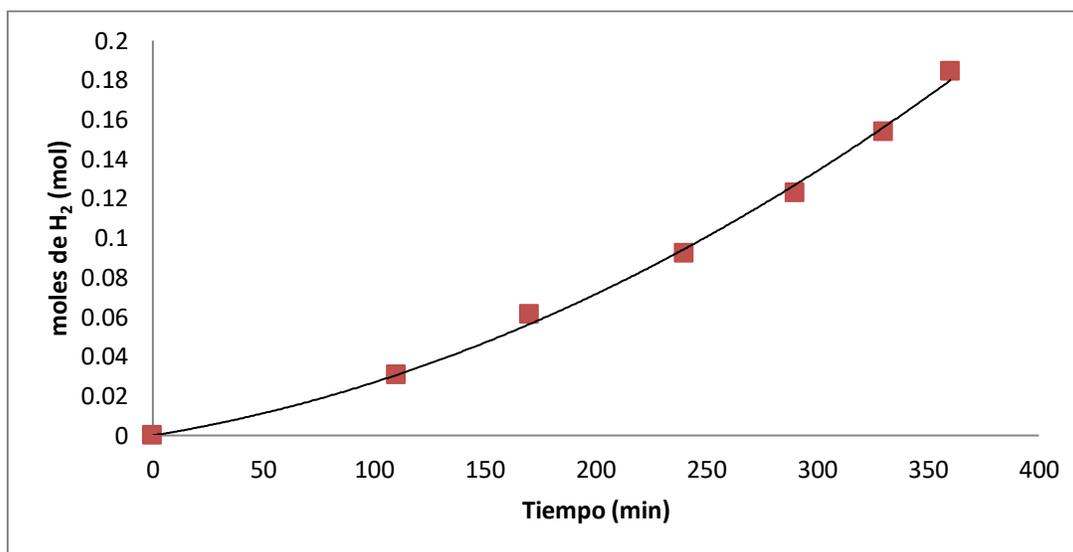


Gráfico 1. Moles de hidrógeno producido contra el tiempo en la primera prueba.

De lo cual se obtuvo que la ecuación que representa de mejor manera la variación de los datos fue:

$$\text{Moles H}_2 = 8.87\text{E-}07 t^2 + 1.81\text{E-}04 t$$

$$R^2 = 0.9972367$$

De la misma manera con las otras pruebas se encontraron sus respectivas ecuaciones y su coeficiente de determinación R^2 , estas se consignaron en la tabla 2:

Prueba	Ecuación	R^2
1	Moles $H_2 = 8.87E-07 t^2 + 1.81E-04 t$	0.997
2	Moles $H_2 = -5.99E-08 t^2 + 4.29E-04 t$	0.999
3	Moles $H_2 = 8.01E-07 t^2 + 6.41E-05 t$	1
4	Moles $H_2 = 1.47E-07 t^2 + 2.36E-04 t$	0.995
5	Moles $H_2 = 1.88E-06 t^2 + 1.74E-04 t$	0.999
6	Moles $H_2 = 4.42E-07 t^2 + 2.13E-04 t$	0.993

Tabla 2. Ecuaciones resultantes de las pruebas llevadas a cabo con su respectivo coeficiente de determinación.

Estos resultados muestran que cuando la concentración de azúcar de caña se disminuye, el tiempo para producir la misma cantidad de hidrógeno aumenta como se nota en las primeras 4 pruebas, donde para producir 2 ml de hidrógeno se registra un tiempo cercano a los 150 minutos, para concentraciones altas (pruebas 1 y 2), y cerca de 250 minutos para concentraciones bajas (pruebas 3 y 4) (42, 43, 47).

Otra cosa que se puede observar al hacer la comparación de las pruebas 1 y 2 es que la producción de hidrógeno se da de manera más constante con un voltaje aproximado de 1.56 V (prueba 2), mientras que con un voltaje aproximado a 1.48V (prueba 1) inicia lentamente, pero al transcurrir la prueba, después de los 3 ml, la producción de hidrógeno se da más rápidamente que en la prueba 2.

Un comportamiento similar se da al hacer cambios en los electrodos, donde la producción de hidrógeno se da de una manera más rápida con la combinación plata – aluminio (prueba 5) ya que se alcanzaron los 3 ml en un tiempo de 180 minutos, mientras que con la combinación grafito – aluminio (prueba 1), esta producción se alcanzó a los 240 minutos.

En cuanto a la producción de hidrógeno con la combinación aluminio – aluminio (prueba 6) se hace de manera constante, pero más lentamente que las otras dos combinaciones, hasta los 3 ml, después de esto el tiempo de producción se hace similar al de la prueba 1. Lo otro es que esta combinación nos da la posibilidad de alcanzar 1mA de corriente con un voltaje muy bajo (aproximadamente 0.9 V), en comparación con los alcanzados en las otras pruebas (aproximadamente 1.5 V) (16).

Adicionalmente se encontró que la variación del pH y de la conductividad de las soluciones fue despreciable, para cada una de las pruebas, como se puede observar de los datos del anexo 1. No existe un proceso de acidificación o de alcalinización de las soluciones, además, como es de esperarse, la conductividad permanece constante.

2.2. Determinación del modelo cinético

Para determinar este modelo la primera opción fueron las líneas de tendencia y las correspondientes ecuaciones obtenidas en las pruebas, pero estas no tenían un comportamiento regular, lo que no ayudó mucho para obtener el modelo cinético adecuado. Teniendo la necesidad de determinar este modelo, se hizo una revisión bibliográfica encontrando tres opciones que podrían ajustarse al comportamiento de estos (42-44, 48, 49), la primera fue el modelo Gompertz modificado cuyos parámetros de H_{max} , R_m y λ , fueron encontrados utilizando la herramienta Solver de Excel 2016 que usa el algoritmo de Newton 100 iteraciones, precisión de 10^{-6} , convergencia de 10^{-4} y 5% de tolerancia en el ajuste de los datos. Estos parámetros fueron graficados, para la primera prueba, junto con los datos encontrados en el laboratorio:

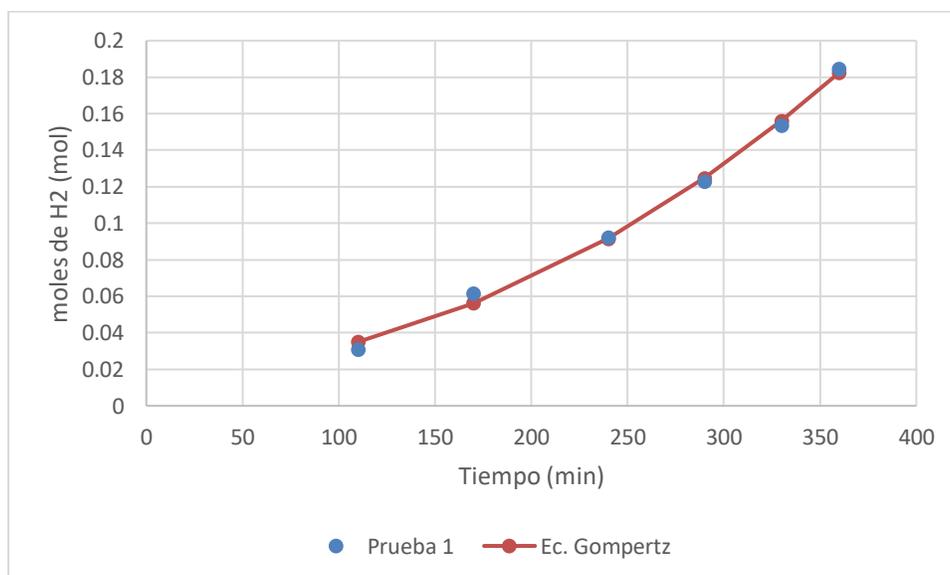


Gráfico 2. Datos de la primera prueba graficados para la ecuación de Gompertz.

Al ver la gráfica se nota que los datos se ajustan mucho a la línea hecha para la ecuación de Gompertz, igualmente se encontraron los valores correspondientes a los coeficientes faltantes y el valor R^2 :

H_{max}	2,184	R_m	0,0984
λ	5,257	R^2	0,997

Tabla 3. Coeficientes de la ecuación de Gompertz, para los moles en primera prueba y el R^2 correspondiente a los datos.

La segunda opción fue utilizar el modelo de Pseudo primer orden en su forma lineal que, para la prueba uno, resultó:

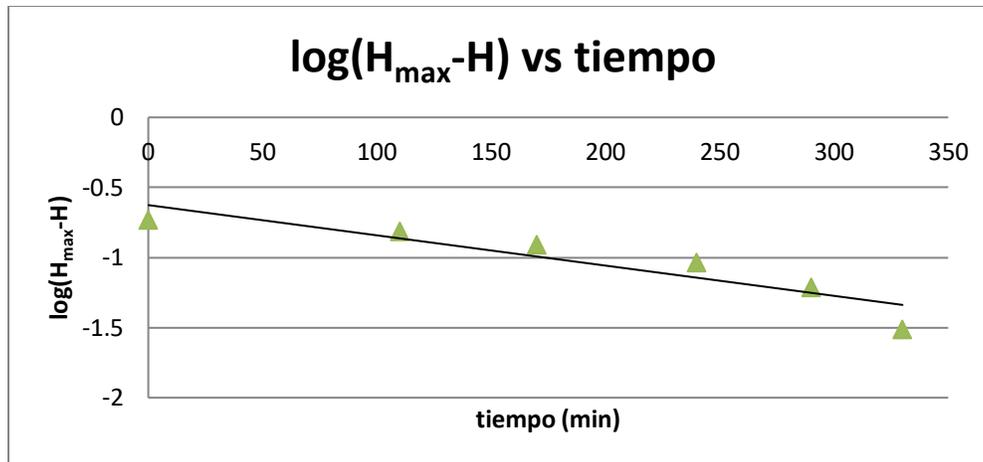


Gráfico 3. Datos de la primera prueba graficados para el Modelo Pseudo primer orden.

Del cual se obtuvo la ecuación:

$$\log(H_{\max}-H)=-0.0022t + 0.6259$$

$$R^2=0.8434$$

Al hacer la comparación de la ecuación de pseudo primer orden con la ecuación obtenida a partir de los datos para esta podemos determinar que:

$$\log(H_{\max}) = -0,62588827$$

$$\frac{k_1}{2.303} = 0,00215798$$

De lo que se tiene que:

$$H_{\max} = 0,23665285 \text{ mol}$$

$$k_1 = 0,00496983 \left(\frac{1}{\text{min}}\right)$$

La tercera opción era el modelo de Pseudo segundo orden en su forma lineal que, para la primera prueba, se hizo la siguiente gráfica:

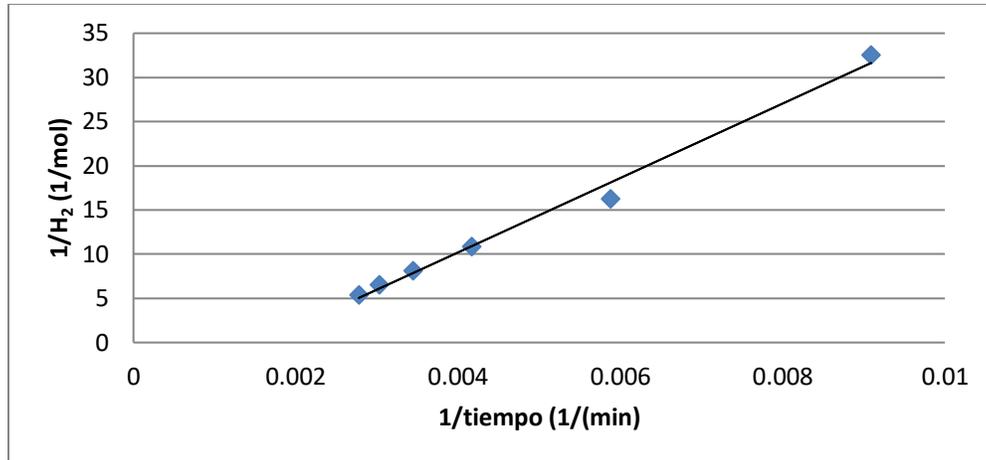


Gráfico 4. Datos de la primera prueba graficados para el Modelo de Pseudo segundo orden.

De lo cual se obtuvo la ecuación:

$$\frac{1}{H_2} = \frac{4211,87}{t} - 6,66$$

$$R^2=0,99111238$$

Al comparar con la ecuación de pseudo segundo orden se puede determinar que:

$$\frac{1}{H_{Max}} = -6,65530033$$

$$\frac{1}{k_2 H_{Max}^2} = 4211,86746$$

Por lo tanto:

$$H_{Max} = -0,15025618 \text{ mol}$$

$$k_2 = 0,01051624 \left(\frac{1}{\text{mol}} \right)$$

Comparando los resultados para el R² en cada uno de los modelos se realizó la tabla 4:

Prueba	Gompertz	Pseudo primero	Pseudo segundo
1	0,997	0,843	0,991
2	0,999	0,958	0,999
3	0,999	1	1
4	0,999	0,990	0,994
5	0,999	0,905	0,999
6	0,990	0,942	0,998

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos para R^2 con los diferentes modelos.

Tomando en cuenta la anterior tabla podemos decir que los datos de la prueba 3 no ayudan mucho en la consecución del modelo cinético, ya que al haber tan poca producción de hidrógeno, solo hubo dos puntos para hacer las gráficas, llevando a que sus resultados distaran de los obtenidos para las otras pruebas. Igualmente, si se hace la comparación de los datos que se plasman en la tabla 4, esta muestra que los mejores resultados se encuentran con el modelo de Gompertz.

Seguidamente se hace la comparación de los resultados obtenidos para H_{max} , para lo cual se realizó la tabla 5:

Prueba	Gompertz	Pseudo primer orden	Pseudo segundo orden
1	2,184	0,237	-0,150
2	0,200	0,134	1,079
3	0,980	0,062	-32,518
4	6,344	0,096	1,674
5	0,328	0,099	-0,088
6	4,601	0,138	-0,298

Tabla 5. Resultados obtenidos para el H máximo, en las ecuaciones de Gompertz, Pseudo primer y Pseudo segundo orden en cada una de las pruebas.

La comparación de los resultados de las pruebas, muestra que el hecho de que la producción máxima para algunos datos haya dado negativa, hace que el modelo de Pseudo segundo orden no sea tomado en cuenta puesto que biofísicamente esto no puede ocurrir. Ahora al comparar los otros dos modelos se nota que los mejores resultados para el H_{max} , al igual que en la tabla anterior, se obtienen con el modelo de Gompertz. Esto lleva a escoger como modelo cinético el modelo de Gompertz.

Con el modelo cinético escogido y comparando los resultados obtenidos para este, se puede observar que en las pruebas donde el voltaje utilizado era menor, pruebas 1, 4 y 6, se dieron los mejores resultados para el H_{max} . En cuanto al cambio de electrodos estos muestran que, aunque la mejor producción se da para el grafito – aluminio, una segunda opción podría ser la combinación aluminio – aluminio, ya que usa menos voltaje que todas las pruebas realizadas, su único inconveniente es que el electrodo se degrada en el agua residual.

2.3. Estudio de la eficiencia energética y otras propiedades medidas en la producción de hidrógeno para el reactor BEAMR vidrio

Otra parte de la evaluación del reactor BEAMR es la eficiencia de este en el aprovechamiento de la energía que se le suministra en comparación con la energía que podría obtenerse a partir del hidrógeno producido por este. Para comenzar, utilizando la ecuación

$$P=I*V$$

donde P corresponde a la potencia en vatios (W), I a la corriente en amperios (A) y V al voltaje (V). En la cual reemplazamos los datos de corriente y voltaje de cada una de las pruebas, y se calculó la potencia para cada uno de los intervalos de tiempo y con estos la potencia promedio.

La energía total suministrada en kWh se obtuvo de la ecuación

$$E=P_{\text{prom}}*T_{\text{(total en horas)}}$$

donde E es la energía suministrada, P_{prom} es la potencia promedio para cada una de las pruebas en kilovatios (kW) y $T_{\text{(total en horas)}}$ el tiempo total en el que se le hizo la prueba.

Los resultados obtenidos para cada una de las pruebas se encuentran consignados en la tabla 6.

prueba	Potencia promedio (W)	Energía (kWh)
1	3,29E-06	1,98E-05
2	1,62E-06	8,88E-06
3	1,64E-06	6,83E-06
4	1,50E-06	8,22E-06
5	2,91E-06	9,21E-06
6	9,46E-07	5,52E-06

Tabla 6. Potencia promedio gastada en cada una de las pruebas y su equivalente energético.

Para calcular la energía del hidrógeno producido se hizo, como primera medida, un análisis de cromatografía al gas producido. Este análisis se realizó en una prueba adicional bajo las mismas condiciones de la prueba 1, encontrando que este gas contiene hidrógeno (ver anexo) en gran proporción, el gas restante contiene otros elementos que no fueron medidos por no ser interés de este trabajo, se asumió igual para todas las pruebas hechas, ya que al utilizar el reactor BEAMR, este nos garantiza que el gas producido en la cámara catiónica sea, en su mayoría, hidrógeno.

Con el dato de volumen (V) obtenido para cada una de las pruebas y una densidad (ρ) para el hidrógeno de $8,99 \times 10^{-8}$ kg/ml, se calculó la masa, este resultado se multiplicó por el poder calorífico del hidrógeno que es 120 MJ/kg(12, 29), calculando la energía equivalente para cada una de estas masas, en MJ como en kWh.

prueba	energía	
	MJ	kWh
1	6,27E-05	1,74E-05
2	4,18E-05	1,16E-05
3	2,09E-05	5,81E-06
4	3,14E-05	8,71E-06
5	3,14E-05	8,71E-06
6	4,18E-05	1,16E-05

Tabla 7. Energía que podría obtenerse con la masa de H₂ producida.

Con estos datos de energía que podría obtenerse del hidrógeno producido y la energía gastada en cada una de las pruebas, se calculó la eficiencia energética del proceso (ϵ) utilizando la ecuación

$$\epsilon = \frac{\text{Energía obtenida del H}_2}{\text{Energía gastada en el proceso}} * 100\%$$

Revisando estos datos se puede observar que la combinación de electrodos aluminio-aluminio, una concentración alta de azúcares y un voltaje bajo (0,9 V) nos da la mejor eficiencia energética. Igualmente, para una concentración baja en azúcares, electrodos de grafito-aluminio y un voltaje de 1,48 V aproximadamente (prueba 4) se obtiene una devolución de la energía suministrada, lo mismo que en la prueba 2, donde la concentración de azúcar fue alta y condiciones similares a la prueba 4.

CONCLUSIONES

Dos tipos de reactores BEAMR fueron evaluados encontrando que el fabricado de vidrio con cámaras gemelas fue el que permitió obtener mejores resultados experimentales. El uso de vidrio garantizó la hermeticidad de las cámaras, a diferencia del reactor construido en aluminio.

El reactor BEAMR fabricado en vidrio permitió obtener un gas con una gran cantidad de hidrógeno, a través de la degradación anaerobia de biomasa por medio de levaduras a nivel de laboratorio.

Aunque la combinación de electrodos aluminio-aluminio (prueba 6) nos ofrece la mejor eficiencia energética puesto que utiliza un voltaje cercano de 0.8 V, no es buena ya que cuando se expone el aluminio al agua residual este se degrada muy rápidamente, haciendo que este se tenga que cambiar con más frecuencia, lo que no ocurre con el grafito. Sin embargo, al tener un voltaje mejor al requerido para generar hidrógeno por vía electroquímica del agua, se evidencia la producción del mismo por medio de los microorganismos.

Los mejores resultados en la producción de hidrógeno y en eficiencia del proceso se dan con la combinación de electrodos grafito-aluminio, un voltaje aproximado de 1.5 V y una corriente eléctrica 1 mA.

El modelo cinético que mejor se adapta a los datos obtenidos en las pruebas es el modelo de Gompertz, puesto que para cada una de las pruebas realizadas su coeficiente de correlación R^2 estuvo alrededor de 0.99 y que para el tiempo en el que se realizaron las pruebas, en la mayoría de los casos nos encontrábamos en la etapa de arranque del proceso. Eso está de acuerdo con lo encontrado en la literatura para este tipo de sistemas.

A pesar de que algunas condiciones no presentan un balance energético positivo, este proceso podría usarse para remediación de efluentes contaminados, siendo parcialmente autosostenible desde el punto de vista energético.

RECOMENDACIONES

Podrían realizarse pruebas a nivel de laboratorio, con aguas residuales tomas de ríos o de los alcantarillados, de igual manera podrían utilizarse los lixiviados de los alimentos, que son ricos en azúcares y serían un excelente insumo para la producción de H₂.

Optimizar el diseño del reactor en vidrio, colocando el punto de unión de los electrodos bajo el nivel del líquido, garantizaría que por este punto no haya pérdidas de gases y que estos circulen directamente hacia el punto de recolección y cuantificación.

Realizar pruebas de mayor duración, que permitan establecer la cinética completa de producción de hidrógeno por vía bioelectroquímica.

En pruebas de larga duración, evaluar los gases que se producen por la cámara anódica, para saber el uso que se les puede dar o que tan contaminantes pueden ser.

Hacer un análisis del comportamiento de las bacterias contenidas en el sustrato y su influencia en la producción de hidrógeno.

Hacer un análisis cromatográfico completo de los gases producidos en la cámara anódica y el porcentaje de los elementos que lo conforman.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bičáková O, Straka P. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(16):11563-78.
2. COMERCIO SDIY. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA Y SU USO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE. *ALERTA TECNOLÓGICA*. 2013:48.
3. Martínez AB, Diana; Bellon, Daniela; Plata, Diana; Latorre, Diana; Porras, Alex; Rincón, Luis editor ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA ECONOMIA DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA. *WORLD ENGINEERING EDUCATION FORUM*; 2013 SEPTIEMBRE 24 A 27; CARTAGENA, COLOMBIA.
4. Mejía Arango JG, Acevedo Alvarez, Carlos Alberto Proyección al año 2025 para el uso del hidrógeno en el sector transporte del Valle de Aburrá. *Scientia et Technica*. 2013;Vol. 18:7.
5. Lache Muñoz A. Producción de hidrógeno a partir de energía solar. *Panorama en Colombia. Revista Elementos*. 2015;5:16.
6. Hoffmann P. *Tomorrow's Energy. Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet*2001.
7. Miyake J, Igarashi Y, Rögner M. *Biohydrogen III. Renewable Energy System Biological Solar Energy Conversion*.2004.
8. Hu H, Fan Y, Liu H. Hydrogen production using single-chamber membrane-free microbial electrolysis cells. *Water research*. 2008;42(15):4172-8.
9. Kargi F, Catalkaya EC. Electrohydrolysis of landfill leachate organics for hydrogen gas production and COD removal. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(14):8252-60.
10. Zhang H, Lin G, Chen J. Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(20):10851-8.
11. Seifert K, Waligorska M, Laniecki M. Hydrogen generation in photobiological process from dairy wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(18):9624-9.
12. Dictor M-C, Joulian C, Touzé S, Ignatiadis I, Guyonnet D. Electro-stimulated biological production of hydrogen from municipal solid waste. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(19):10682-92.
13. Show KY, Lee DJ, Tay JH, Lin CY, Chang JS. Biohydrogen production: Current perspectives and the way forward. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(20):15616-31.
14. Ji C-F, Legrand J, Pruvost J, Chen Z-A, Zhang W. Characterization of hydrogen production by *Platymonas Subcordiformis* in torus photobioreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(13):7200-5.
15. Kargi F, Catalkaya EC. Hydrogen gas production from olive mill wastewater by electrohydrolysis with simultaneous COD removal. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(5):3457-64.

16. Kargi F. Comparison of different electrodes in hydrogen gas production from electrohydrolysis of wastewater organics using photovoltaic cells (PVC)☆. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(5):3450-6.
17. Eroglu E, Eroglu I, Gunduz U, Turker L, Yucel M. Biological hydrogen production from olive mill wastewater with two-stage processes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006;31(11):1527-35.
18. Tommasi T, Ruggeri B, Sanfilippo S. Energy valorisation of residues of dark anaerobic production of Hydrogen. *Journal of Cleaner Production*. 2012;34:91-7.
19. Rozendal RA, Hamelers HV, Rabaey K, Keller J, Buisman CJ. Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends in biotechnology*. 2008;26(8):450-9.
20. Lu L, Xing D, Liu B, Ren N. Enhanced hydrogen production from waste activated sludge by cascade utilization of organic matter in microbial electrolysis cells. *Water research*. 2012;46(4):1015-26.
21. Lu L, Xing D, Ren N. Pyrosequencing reveals highly diverse microbial communities in microbial electrolysis cells involved in enhanced H₂ production from waste activated sludge. *Water research*. 2012;46(7):2425-34.
22. Nam J-Y, Logan BE. Enhanced hydrogen generation using a saline catholyte in a two chamber microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(23):15105-10.
23. Nam J-Y, Logan BE. Optimization of catholyte concentration and anolyte pHs in two chamber microbial electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(24):18622-8.
24. Ditzig J, Liu H, Logan B. Production of hydrogen from domestic wastewater using a bioelectrochemically assisted microbial reactor (BEAMR). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007;32(13):2296-304.
25. Eker S, Kargi F. Hydrogen gas production from electrohydrolysis of industrial wastewater organics by using photovoltaic cells (PVC)☆. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(23):12761-6.
26. Cusick RD, Kiely PD, Logan BE. A monetary comparison of energy recovered from microbial fuel cells and microbial electrolysis cells fed winery or domestic wastewaters. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(17):8855-61.
27. Kargi F, Uzunçar S. Simultaneous hydrogen gas formation and COD removal from cheese whey wastewater by electrohydrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(16):11656-65.
28. Kargi F, Uzunçar S. Electro-hydrolysis of cheese whey solution for hydrogen gas production and chemical oxygen demand (COD) removal using photo-voltaic cells (PVC). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(21):15841-9.
29. Kargi F, Catalkaya EC, Uzunçar S. Hydrogen gas production from waste anaerobic sludge by electrohydrolysis: Effects of applied DC voltage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(3):2049-56.
30. Escapa A, Gómez X, Tartakovsky B, Morán A. Estimating microbial electrolysis cell (MEC) investment costs in wastewater treatment plants: Case study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(24):18641-53.
31. Wu TY, Hay JXW, Kong LB, Juan JC, Jahim JM. Recent advances in reuse of waste material as substrate to produce biohydrogen by purple non-sulfur (PNS) bacteria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(5):3117-22.

32. Logan B, Grot S, Mallouk T, Liu H, inventors; The Penn State Research Foundation, Ion Power Inc., assignee. Bio-electrochemically assisted microbial reactor that generates hydrogen gas and methods of generating hydrogen gas 2010.
33. Wrana N, Sparling R, Cicek N, Levin DB. Hydrogen gas production in a microbial electrolysis cell by electrohydrogenesis. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18:S105-S11.
34. Ghasemi M, Wan Daud WR, Ismail M, Rahimnejad M, Ismail AF, Leong JX, et al. Effect of pre-treatment and biofouling of proton exchange membrane on microbial fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012.
35. Clesceri LS, Greenberg AE, Eaton AD. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 20 ed: American Public Health association, American Water Works Association and Water Environment Federation; 1999.
36. Logan BE. Electricity and hydrogen production using microbial fuel cell-based technologies 2008 [Available from: http://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/web_presentations/MFC-MECs-Bruce-Logan-1-2-08.pdf].
37. Ambler JR, Logan BE. Evaluation of stainless steel cathodes and a bicarbonate buffer for hydrogen production in microbial electrolysis cells using a new method for measuring gas production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(1):160-6.
38. Wagner RC, Regan JM, Oh SE, Zuo Y, Logan BE. Hydrogen and methane production from swine wastewater using microbial electrolysis cells. *Water research*. 2009;43(5):1480-8.
39. Selembo PA, Perez JM, Lloyd WA, Logan BE. High hydrogen production from glycerol or glucose by electrohydrogenesis using microbial electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(13):5373-81.
40. Nemestóthy Nándor BP, Rózsenszki Tamás, Kumar Gopalakrishnan, Koók László, Kelemen Gábor, Kim Sang-Hyoun, Bélafi-Bakó Katalin. Assessment via the modified gompertz-model reveals new insights concerning the effects of ionic liquids on biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018;43:6.
41. Noblecourt Alexandre CG, Larroche Christian, Santa-Catalina Gaëlle, Trably Eric, Fontanille Pierre. High hydrogen production rate in a submerged membrane anaerobic bioreactor. *International journal of Hydrogen Energy*. 2017;42:10.
42. Blanco Londoño SA. Producción de biohidrógeno a través de la fermentación oscura de residuos – Revisión crítica. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2013:118.
43. Blanco Londoño SARC, Tatiana. Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011). *Ingeniare Revista chilena de ingeniería*. 2012;20 #3:14.
44. Kumar KV. Linear and non-linear regression analysis for the sorption kinetics of methylene blue onto activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*. 2006:1538–44.
45. Cheng S, Logan BE. High hydrogen production rate of microbial electrolysis cell (MEC) with reduced electrode spacing. *Bioresource technology*. 2011;102(3):3571-4.
46. Seamsirimongkol P, Rangsunvigit P, Leethochawalit M, Chavadej S. Hydrogen production from alcohol distillery wastewater containing high potassium and sulfate using an anaerobic sequencing batch reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(20):12810-21.
47. Show KY, Lee,D.J., Tay,J.H., Lin,C.Y., Chang,J.S. . Biohydrogen production: Current perspectives and the way forward. *international journal of hydrogen energy* 2012:16.
48. Nasr M, Tawfik A, Ookawara S, Suzuki M. Biological Hydrogen Production from Starch Wastewater Using a Novel Up-flow Anaerobic Staged Reactor. *BioResources.com*. 2009:17.

49. Donggou S, Bing H, Wengang Z, Huaiyuan Z, Wen W, Jing D. Kinetic models of hydrogen production process by batch anaerobic fermentation from contained sugar wastewater. *Advanced Materials Research*. 2013;634-638:6.

ANEXOS

1.

prueba	azúcar de caña				solución amortiguante			
	conductividad (mS)		pH		conductividad (mS)		pH	
	inicial	Final	inicial	final	inicial	final	inicial	final
1	13,09	12,22	4,92	4,92	25,02	25,02	7,64	7,71
2	2,51	2,85	3,43	4	15,45	17,68	7,71	7,68
3	10,81	11,7	4,39	4,42	21,3	22,4	7,7	7,64
4	2,93	3,15	3,89	3,83	21,8	22,4	7,67	7,63
5	2,91	3,43	3,98	3,98	21	22,8	7,64	7,66
6	2,66	2,97	4,01	4,01	20,3	21,7	7,68	7,68

Tabla 8. Datos obtenidos para la conductividad y el pH en cada una de las pruebas al principio y al final de estas.

2.

TIEMPO (min)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (kW)	ENERGÍA (kWh)	VOLUMEN CATODO H2	MOLES DE H2
10	0,001	1,481	0,000001481	2,46833E-07	0	0
20	0,001	1,482	0,000001482	0,000000247	0	0
30	0,001	1,484	0,000001484	2,47333E-07	0	0
40	0,002	1,484	0,000002968	4,94667E-07	0	0
50	0,002	1,486	0,000002972	4,95333E-07	0	0
60	0,002	1,487	0,000002974	4,95667E-07	0	0
70	0,002	1,483	0,000002966	4,94333E-07	0	0
80	0,002	1,481	0,000002962	4,93667E-07	0	0
90	0,002	1,478	0,000002956	4,92667E-07	1	0,03075201
100	0,002	1,477	0,000002954	4,92333E-07	1	0,03075201
110	0,002	1,477	0,000002954	4,92333E-07	1	0,03075201
120	0,002	1,478	0,000002956	4,92667E-07	1	0,03075201
130	0,002	1,479	0,000002958	0,000000493	1	0,03075201
140	0,002	1,479	0,000002958	0,000000493	2	0,06150402
150	0,002	1,479	0,000002958	0,000000493	2	0,06150402
160	0,002	1,479	0,000002958	0,000000493	2	0,06150402
170	0,002	1,479	0,000002958	0,000000493	2	0,06150402
180	0,002	1,479	0,000002958	0,000000493	2	0,06150402
190	0,002	1,481	0,000002962	4,93667E-07	2	0,06150402
200	0,002	1,481	0,000002962	4,93667E-07	2	0,06150402
210	0,002	1,481	0,000002962	4,93667E-07	2	0,06150402

220	0,002	1,482	0,000002964	0,000000494	3	0,09225603
230	0,002	1,481	0,000002962	4,93667E-07	3	0,09225603
240	0,002	1,481	0,000002962	4,93667E-07	3	0,09225603
250	0,002	1,482	0,000002964	0,000000494	3	0,09225603
260	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	3	0,09225603
270	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	3	0,09225603
280	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	4	0,12300804
290	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	4	0,12300804
300	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	4	0,12300804
310	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	5	0,15376005
320	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	5	0,15376005
330	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	5	0,15376005
340	0,003	1,483	0,000004449	7,415E-07	5	0,15376005
350	0,003	1,482	0,000004446	0,000000741	5	0,15376005
360	0,003	1,483	0,000004449	7,415E-07	6	0,18451206

Tabla 9. Datos resultantes de la primera toma de datos.

3.

a	2,88E-05	Sigma a	3,02E-06
b	5,88E-03	Sigma b	9,32E-04
R²	0.9972367		

Tabla 10. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la primera prueba, con su respectivo error y el R².

4.

a	8.87E-07	Sigma a	0.93E-07
b	1.81E-04	Sigma b	0.29E-04
R²	0.9972367		

Tabla 11. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la primera prueba, con su respectivo error y el R².

5.

TIEMPO (min)	CORRIENTE (mA)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (kW)	ENERGÍA (kWh)	VOLUMEN CATODO H2	MOLES DE H2
10	0,99	1,57	1,5543E-06	2,5905E-07	0	0
20	1,11	1,569	1,7416E-06	5,8053E-07	0	0
30	1,07	1,569	1,6788E-06	8,39415E-07	0	0
40	1,13	1,566	1,7696E-06	1,17972E-06	0	0
50	1,11	1,566	1,7383E-06	1,44855E-06	1	0,03075201
60	1,09	1,566	1,7069E-06	1,70694E-06	1	0,03075201
70	1,13	1,566	1,7696E-06	2,06451E-06	1	0,03075201
80	1,06	1,566	1,66E-06	2,21328E-06	1	0,03075201
90	1,08	1,566	1,6913E-06	2,53692E-06	1	0,03075201
100	1,09	1,566	1,7069E-06	2,8449E-06	1	0,03075201
110	1,09	1,566	1,7069E-06	3,12939E-06	1	0,03075201
120	1,09	1,565	1,7059E-06	3,4117E-06	2	0,06150402
130	1,09	1,566	1,7069E-06	3,69837E-06	2	0,06150402
140	1,06	1,565	1,6589E-06	3,87077E-06	2	0,06150402
150	1,07	1,566	1,6756E-06	4,18905E-06	2	0,06150402
160	1,07	1,565	1,6746E-06	4,46547E-06	2	0,06150402
170	1,09	1,565	1,7059E-06	4,83324E-06	2	0,06150402
180	1,04	1,565	1,6276E-06	4,8828E-06	2	0,06150402
190	1,04	1,566	1,6286E-06	5,15736E-06	3	0,09225603
200	1,05	1,566	1,6443E-06	0,000005481	3	0,09225603
210	1,04	1,565	1,6276E-06	5,6966E-06	3	0,09225603
220	1,01	1,565	1,5807E-06	5,79572E-06	3	0,09225603
230	0,99	1,566	1,5503E-06	5,94297E-06	3	0,09225603
240	1,02	1,564	1,5953E-06	6,38112E-06	3	0,09225603
250	0,98	1,564	1,5327E-06	6,38633E-06	3	0,09225603
260	0,95	1,565	1,4868E-06	6,44258E-06	3	0,09225603
270	0,95	1,565	1,4868E-06	6,69038E-06	4	0,12300804
280	0,93	1,566	1,4564E-06	6,79644E-06	4	0,12300804
290	0,95	1,565	1,4868E-06	7,18596E-06	4	0,12300804
300	0,92	1,565	1,4398E-06	0,000007199	4	0,12300804
310	0,95	1,568	1,4896E-06	7,69627E-06	4	0,12300804
320	0,9	1,565	1,4085E-06	0,000007512	4	0,12300804
330	0,9	1,566	1,4094E-06	7,7517E-06	4	0,12300804

Tabla 12. Datos resultantes de la segunda toma de datos.

6.

a	-1.95E-06	Sigma a	0.146E-05
b	1.39E-02	Sigma b	0.375E-03
R²		0.9995903	

Tabla 13. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la segunda prueba, con su respectivo error y el R².

7.

a	-5.99E-08	Sigma a	0.448E-07
b	4.29E-04	Sigma b	0.115E-04
R²		0.9995903	

Tabla 14. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la segunda prueba, con su respectivo error y el R².

8.

TIEMPO (min)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (kW)	ENERGÍA (kWh)	VOLUMEN CATODO H2	MOLES DE H2
10	0,001	1,641	0,000001641	2,735E-07	0	0
20	0,001	1,64	0,00000164	5,4667E-07	0	0
30	0,001	1,639	0,000001639	8,195E-07	0	0
40	0,001	1,64	0,00000164	1,0933E-06	0	0
50	0,001	1,64	0,00000164	1,3667E-06	0	0
60	0,001	1,64	0,00000164	0,00000164	0	0
70	0,001	1,64	0,00000164	1,9133E-06	0	0
80	0,001	1,64	0,00000164	2,1867E-06	0	0
90	0,001	1,64	0,00000164	0,00000246	0	0
100	0,001	1,639	0,000001639	2,7317E-06	0	0
110	0,001	1,639	0,000001639	3,0048E-06	1	0,03075201
120	0,001	1,639	0,000001639	3,278E-06	1	0,03075201
130	0,001	1,639	0,000001639	3,5512E-06	1	0,03075201
140	0,001	1,639	0,000001639	3,8243E-06	1	0,03075201
150	0,001	1,639	0,000001639	4,0975E-06	1	0,03075201
160	0,001	1,639	0,000001639	4,3707E-06	1	0,03075201
170	0,001	1,639	0,000001639	4,6438E-06	1	0,03075201
180	0,001	1,639	0,000001639	4,917E-06	1	0,03075201
190	0,001	1,639	0,000001639	5,1902E-06	1	0,03075201
200	0,001	1,639	0,000001639	5,4633E-06	1	0,03075201

210	0,001	1,639	0,000001639	5,7365E-06	1	0,03075201
220	0,001	1,639	0,000001639	6,0097E-06	1	0,03075201
230	0,001	1,639	0,000001639	6,2828E-06	2	0,06150402
240	0,001	1,638	0,000001638	6,552E-06	2	0,06150402
250	0,001	1,639	0,000001639	6,8292E-06	2	0,06150402

Tabla 15. Datos resultantes de la tercera toma de datos.

9.

a	2.60E-05	Sigma a	9.77E-21
b	2.08E-03	Sigma b	2.14E-18
R²		1	

Tabla 16. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la tercera prueba, con su respectivo error y el R².

10.

a	8.01E-07	Sigma a	8.55E-22
b	6.41E-05	Sigma b	1.87E-19
R²		1	

Tabla 17. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la tercera prueba, con su respectivo error y el R².

11.

TIEMPO (min)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (kW)	ENERGÍA (kWh)	VOLUMEN CATODO H ₂	MOLES DE H ₂
10	0,001	1,496	0,000001496	2,49333E-07	0	0
20	0,001	1,496	0,000001496	4,98667E-07	0	0
30	0,001	1,496	0,000001496	0,000000748	0	0
40	0,001	1,496	0,000001496	9,97333E-07	0	0
50	0,001	1,495	0,000001495	1,24583E-06	1	0,03075201
60	0,001	1,495	0,000001495	0,000001495	1	0,03075201
70	0,001	1,495	0,000001495	1,74417E-06	1	0,03075201
80	0,001	1,495	0,000001495	1,99333E-06	1	0,03075201
90	0,001	1,495	0,000001495	2,2425E-06	1	0,03075201
100	0,001	1,495	0,000001495	2,49167E-06	1	0,03075201
110	0,001	1,495	0,000001495	2,74083E-06	1	0,03075201
120	0,001	1,495	0,000001495	0,00000299	1	0,03075201
130	0,001	1,495	0,000001495	3,23917E-06	1	0,03075201

140	0,001	1,495	0,000001495	3,48833E-06	1	0,03075201
150	0,001	1,495	0,000001495	3,7375E-06	1	0,03075201
160	0,001	1,495	0,000001495	3,98667E-06	1	0,03075201
170	0,001	1,495	0,000001495	4,23583E-06	1	0,03075201
180	0,001	1,494	0,000001494	0,000004482	2	0,06150402
190	0,001	1,494	0,000001494	0,000004731	2	0,06150402
200	0,001	1,496	0,000001496	4,98667E-06	2	0,06150402
210	0,001	1,494	0,000001494	0,000005229	2	0,06150402
220	0,001	1,494	0,000001494	0,000005478	2	0,06150402
230	0,001	1,494	0,000001494	0,000005727	2	0,06150402
240	0,001	1,494	0,000001494	0,000005976	2	0,06150402
250	0,001	1,494	0,000001494	0,000006225	2	0,06150402
260	0,001	1,494	0,000001494	0,000006474	2	0,06150402
270	0,001	1,494	0,000001494	0,000006723	2	0,06150402
280	0,001	1,494	0,000001494	0,000006972	2	0,06150402
290	0,001	1,494	0,000001494	0,000007221	2	0,06150402
300	0,001	1,494	0,000001494	0,00000747	3	0,09225603
310	0,001	1,496	0,000001496	7,72933E-06	3	0,09225603
320	0,001	1,494	0,000001494	0,000007968	3	0,09225603
330	0,001	1,494	0,000001494	0,000008217	3	0,09225603

Tabla 18. Datos resultantes de la cuarta toma de datos.

12.

a	4.77E-06	Sigma a	0.47E-05
b	7.68E-03	Sigma b	0.13E-02
R²		0.9949007	

Tabla 19. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la cuarta prueba, con su respectivo error y el R².

13.

a	1.47E-07	Sigma a	0.143E-06
b	2.36E-04	Sigma b	0.408E-04
R²		0.9949007	

Tabla 20. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la cuarta prueba, con su respectivo error y el R².

14.

TIEMPO (min)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (kW)	ENERGÍA (kWh)	VOLUMEN CATODO H2	MOLES DE H2
10	0,001	1,484	0,000001484	2,47333E-07	0	0
20	0,002	1,487	0,000002974	9,91333E-07	0	0
30	0,002	1,488	0,000002976	0,000001488	0	0
40	0,002	1,489	0,000002978	1,98533E-06	0	0
50	0,002	1,491	0,000002982	0,000002485	0	0
60	0,002	1,492	0,000002984	0,000002984	0	0
70	0,002	1,492	0,000002984	3,48133E-06	1	0,03075201
80	0,002	1,494	0,000002988	0,000003984	1	0,03075201
90	0,002	1,493	0,000002986	0,000004479	1	0,03075201
100	0,002	1,493	0,000002986	4,97667E-06	1	0,03075201
110	0,002	1,495	0,00000299	5,48167E-06	1	0,03075201
120	0,002	1,496	0,000002992	0,000005984	2	0,06150402
130	0,002	1,497	0,000002994	0,000006487	2	0,06150402
140	0,002	1,497	0,000002994	0,000006986	2	0,06150402
150	0,002	1,497	0,000002994	0,000007485	2	0,06150402
160	0,002	1,497	0,000002994	0,000007984	3	0,09225603
170	0,002	1,498	0,000002996	8,48867E-06	3	0,09225603
180	0,002	1,498	0,000002996	0,000008988	3	0,09225603
190	0,002	1,498	0,000002996	9,48733E-06	3	0,09225603

Tabla 21. Datos resultantes de la quinta toma de datos.

15.

a	6.13E-05	Sigma a	0.88E-06
b	5.65E-03	Sigma b	0.14E-03
R²		0.9999818	

Tabla 22. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la quinta prueba, con su respectivo error y el R².

16.

a	1.88E-06	Sigma a	0.27E-07
b	1.74E-04	Sigma b	0.43E-05
R²		0.9999818	

Tabla 23. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la quinta prueba, con su respectivo error y el R².

17.

TIEMPO (min)	CORRIENTE (mA)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (kW)	ENERGÍA (kWh)	VOLUMEN CATODO H2	MOLES DE H2
10	0,8	0,901	7,208E-07	1,20133E-07	0	0
20	0,88	0,901	7,9288E-07	2,64293E-07	0	0
30	0,86	0,901	7,7486E-07	3,8743E-07	0	0
40	0,95	0,901	8,5595E-07	5,70633E-07	0	0
50	0,95	0,901	8,5595E-07	7,13292E-07	0	0
60	0,93	0,901	8,3793E-07	8,3793E-07	0	0
70	1,05	0,901	9,4605E-07	1,10373E-06	0	0
80	1	0,9	0,0000009	0,0000012	1	0,03075201
90	1,06	0,9	9,54E-07	0,000001431	1	0,03075201
100	1,01	0,9	9,09E-07	0,000001515	1	0,03075201
110	1,05	0,9	9,45E-07	1,7325E-06	1	0,03075201
120	1,05	0,9	9,45E-07	0,00000189	1	0,03075201
130	1,01	0,9	9,09E-07	1,9695E-06	1	0,03075201
140	1,07	0,899	9,6193E-07	2,2445E-06	1	0,03075201
150	1,06	0,9	9,54E-07	0,000002385	2	0,06150402
160	1,05	0,9	9,45E-07	0,00000252	2	0,06150402
170	1,06	0,9	9,54E-07	0,000002703	2	0,06150402
180	1,06	0,9	9,54E-07	0,000002862	2	0,06150402
190	1,08	0,9	9,72E-07	0,000003078	2	0,06150402
200	1,09	0,9	9,81E-07	0,00000327	2	0,06150402
210	1,08	0,9	9,72E-07	0,000003402	2	0,06150402
220	1,06	0,899	9,5294E-07	3,49411E-06	2	0,06150402
230	1,15	0,899	1,0339E-06	3,96309E-06	2	0,06150402
240	1,12	0,899	1,0069E-06	4,02752E-06	2	0,06150402
250	1,08	0,899	9,7092E-07	4,0455E-06	2	0,06150402
260	1,15	0,899	1,0339E-06	4,48002E-06	3	0,09225603
270	1,11	0,899	9,9789E-07	4,49051E-06	3	0,09225603
280	1,16	0,899	1,0428E-06	4,86659E-06	3	0,09225603
290	1,13	0,899	1,0159E-06	4,91004E-06	3	0,09225603
300	1,1	0,899	9,889E-07	4,9445E-06	3	0,09225603
310	1,07	0,899	9,6193E-07	4,96997E-06	3	0,09225603
320	1,17	0,899	1,0518E-06	5,60976E-06	4	0,12300804
330	1,12	0,899	1,0069E-06	5,53784E-06	4	0,12300804
340	1,04	0,899	9,3496E-07	5,29811E-06	4	0,12300804
350	1,2	0,899	1,0788E-06	0,000006293	4	0,12300804

Tabla 24. Datos resultantes de la sexta toma de datos.

18.

A	1.44E-05	Sigma a	0.533E-05
B	6.94E-03	Sigma b	0.155E-02
R²	0.9925378		

Tabla 25. Coeficientes de la ecuación resultante, para el volumen en la sexta prueba, con su respectivo error y el R².

19.

A	4.42E-07	Sigma a	0.164E-06
B	2.13E-04	Sigma b	0.476E-04
R²	0.9925378		

Tabla 26. Coeficientes de la ecuación resultante, para los moles en la sexta prueba, con su respectivo error y el R².

20.

m	-0,00215798	Sigma m	0,00046486
b	-0,62588827	Sigma b	0,10247982
R²	0,84344634		

Tabla 27. Coeficientes de la ecuación de Pseudo primer orden, para los moles en primera prueba, con su respectivo error y el R².

21.

m	4211,86746	Sigma m	199,42335
b	-6,65530033	Sigma b	1,04069315
R²	0,99111238		

Tabla 28. Coeficientes para la ecuación de Pseudo segundo orden, para los moles en primera prueba, con su respectivo error y el R².

22.

AMI-7001 Anion Exchange Membranes

Technical Specifications

[View price list](#)
[Place an Order](#)
[Request a Sample](#)
[View MSDS](#)

Technical Specification	AMI-7001S	AMI-7001CR	AMI-7001CRX
	Single Sheet	Continuou s Roll	Continuou s Roll
Functionality	Strong Base Anion Exchange Membrane		
Polymer Structure	Gel polystyrene cross linked with divinylbenzene		
Functional Group	Quaternary Ammonium		
Ionic Form as Shipped	Chloride		
Color	Light Yellow		
Standard Size : US : Metric	48in x 120in 1.22m x 3.05m	48in x 120ft 1.22m x 36.58m	48in x 120ft 1.22m x 36.58m
Standard Thickness (mils) (mm)	18±1 0.45±0.02 5	20±1 0.50±0.025	24±1 0.60±0.025

Electrical Resistance (Ohm.cm²) 0.5 mol/L NaCl	<40	<40	<40
Maximum Current Density (Ampere/m²)	<500	<500	<500
Permselectivity (%) 0.1 mol KCl/kg / 0.5 mol KCl/kg	90	90	90
Total Exchange Capacity (meq/g)	1.3±0.1	1.3±0.1	1.3±0.1
Water Permeability (ml/hr/ft²) @5psi	<3	<10	<25
Mullen Burst Test strength (psi)	>80	>80	>80
Thermal Stability (°C)	90	90	90
Chemical Stability Range (pH)	1-10	1-10	1-10
Preconditioning Procedure	Immerse the membrane in either the application solution or a 5% NaCl solution for 12 hours to allow for membrane hydration and expansion.		
Storage	Store at room temperature and low humidity in sealed air tight container. Storage period not to exceed one year.		

Tabla 29. Especificaciones técnicas de la Membrana Intercambiadora de Iones.

23.

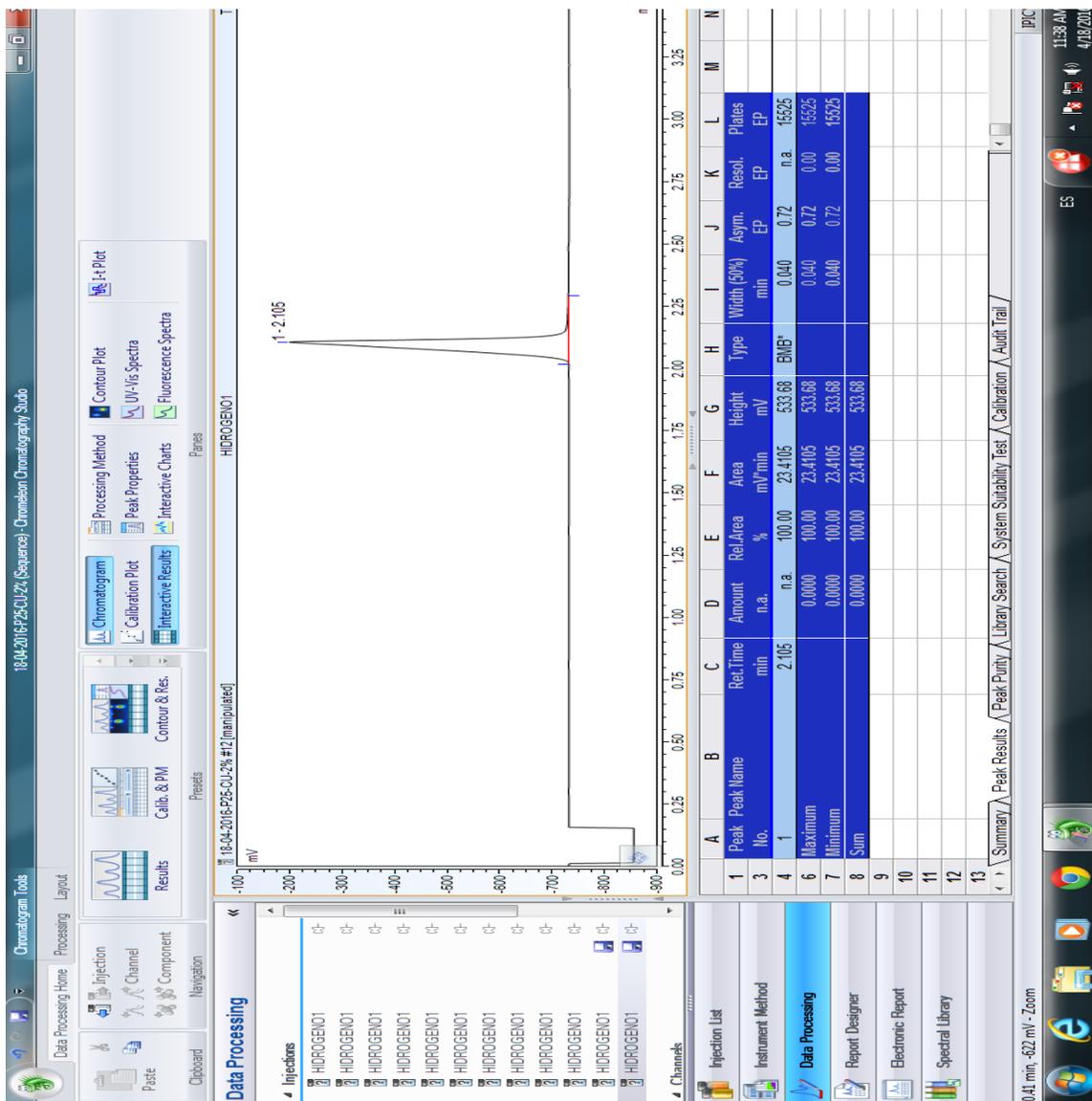


Figura 8. Resultado cromatográfico de la muestra.