

**REACTOR QUE PRODUCE HIDRÓGENO A PARTIR DE LA REDUCCIÓN DE
LOS IONES HIDRONIO PRESENTES EN EL EQUILIBRIO QUÍMICO DEL AGUA
Y POR LA OXIDACIÓN DE LAS MOLÉCULAS ORGÁNICAS PRESENTES EN
EXCREMENTOS**

Campo de la invención

La presente invención pertenece al campo de la electroquímica y consiste en un reactor cuya configuración permite aumentar la eficiencia energética de la producción de hidrógeno a partir de la oxidación de las moléculas orgánicas presentes en los excrementos aplicando electrólisis. Si bien el hidrógeno resulta ser el combustible ideal desde el punto de vista ambiental (el agua es el único producto de reacción), los mecanismos conocidos para su obtención a partir de agua, combustibles fósiles o materia orgánica no son limpios y/o eficientes. Los reactores electrolíticos conforman un campo de investigación relevante para desarrollar sistemas de producción de hidrógeno limpios y eficientes.

Antecedentes de la invención

La utilización de combustibles fósiles como mecanismo para atender en su gran mayoría la demanda energética en el mundo (alrededor del 87%), constituye la fuente principal de emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono), responsables del efecto de calentamiento global que sufre el planeta. Adicionalmente, las reservas de éste tipo de combustibles (carbón, petróleo y gas) no son ilimitadas, razón por la cual no resulta posible ni adecuado continuar dependiendo de ellos como fuente de energía.

Debido a lo anterior, el mercado mundial de las llamadas energías renovables está creciendo de manera sostenida y robusta, lo anterior a pesar de que dichas energías renovables aún se encuentran en fases de investigación para que resulten viables desde el punto de vista económico, así como a pesar de que no siempre son totalmente limpias debido a que para su obtención se requiere en ocasiones de los mismos combustibles fósiles.

De manera particular, el uso de hidrógeno como fuente de energía y su transformación en electricidad ha venido adquiriendo en los últimos años gran importancia. En efecto, es cada vez más alto el porcentaje de hidrógeno que se utiliza en las denominadas pilas de combustible o simplemente como sustituyente directo de la gasolina para lograr el funcionamiento de motores de combustión interna (actualmente, la gran mayoría del hidrógeno que se obtiene en la industria es empleado para la síntesis de amoníaco o para el craqueo del petróleo).

Sin embargo, el principal inconveniente que tiene actualmente el uso del hidrógeno es su producción, pues si bien existen varias formas para obtenerlo, las más utilizadas en la actualidad no se consideran tecnologías limpias, a saber: Mediante el gas natural por medio de un proceso de reformado con vapor, mediante el reformado del carbón para producir hidrógeno mediante un proceso de gasificación, a partir de gasolina o de biomasa gasificada, entre otros. Así, por ejemplo, más de la mitad de todo el hidrógeno que se produce en el mundo se obtiene a partir del reformado de gas natural, el cual es un combustible fósil escaso, costoso y que en su proceso libera dióxido de carbono.

El hidrógeno también puede ser obtenido a partir del agua, ya sea mediante su producción biológica con un bioreactor de algas, utilizando calor (termólisis), por métodos químicos (reducción química), empleando electricidad (electrólisis del agua), entre otros.

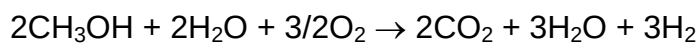
En relación particular con la electrólisis del agua, si bien ésta corresponde a una tecnología limpia para la obtención del hidrógeno (siempre y cuando la electricidad empleada no provenga de los combustibles fósiles), no es un método ampliamente utilizado debido principalmente a que su eficiencia (termodinámica y económica) es poco competitiva en relación con, por ejemplo, el reformado del gas natural.

Frente a dicha situación, en los últimos años se han realizado diferentes esfuerzos para desarrollar mecanismos tendientes a obtener hidrógeno a partir de la electrólisis de materia orgánica, cuyo potencial de oxidación generalmente es menor que el del agua.

Así, por ejemplo, el documento de patente EP1892215 (Junio 2, 2006) revela un dispositivo para la generación electroquímica de hidrógeno a partir de la oxidación de compuestos orgánicos seleccionados entre alcoholes (metanol, etanol, etilen glicol, 2-propanol), aldehídos (formaldehído), ácidos carboxílicos (ácido fórmico) y éteres (dietil éter), y empleando bajas temperaturas de reacción (100 °C o menos).

Dicho dispositivo generador de hidrógeno se caracteriza porque comprende una membrana de partición, un electrodo de combustible ubicado sobre una de las superficies de la membrana de partición, un medio para suministrar un combustible que contiene el compuesto orgánico y agua al electrodo de combustible, un electrodo oxidante provisto en la otra superficie de la membrana de partición, un medio para suministrar un agente oxidante al electrodo oxidante, y un medio para generar y recoger el gas que contiene hidrógeno del electrodo de combustible.

Utilizando metanol como ejemplo, los solicitantes de EP1892215 plantean que la reacción química redox que se presenta puede expresarse mediante la siguiente fórmula:



Donde dicha reacción tendría una eficiencia teórica del 59%.

5 Finalmente, los solicitantes de EP1892215 señalan que usando el dispositivo generador de hidrógeno allá revelado, el hidrógeno puede suministrarse fácilmente a un tanque de almacenamiento de hidrógeno para suministrar hidrógeno a un contenedor de almacenamiento de hidrógeno incorporado en un automóvil eléctrico (automóvil de pila de combustible). Además, cuando se usa hidrógeno
10 como gas de procesamiento o similar en la fabricación de dispositivos semiconductores, el hidrógeno puede suministrarse fácilmente a un sitio de procesamiento proporcionando un medio de almacenamiento de hidrógeno.

Por su parte, en la patente US2008/0277273 (Junio 25, 2008) se revela un sistema
15 para producir gas hidrógeno a partir de materia orgánica biodegradable y utilizando bacterias como biocatalizadores.

En particular, dicha patente divulga un sistema electroquímico para la generación de gas hidrógeno que utiliza preferiblemente aguas residuales, y en donde el
20 reactor consiste básicamente de una carcasa conformada por una sola cámara en cuyo interior están dispuestos el cátodo y el ánodo sin que alguna membrana o separador de intercambio iónico sea dispuesto entre ellos.

En funcionamiento, la carcasa se llena parcialmente con un medio acuoso
25 sustancialmente libre de oxígeno pero que contiene una pluralidad de bacterias exoelectrogénicas que se encargan de oxidar el combustible orgánico biodegradable que está presente en el espacio interior de la carcasa. Adicionalmente y de manera opcional, dicho medio acuoso incluye un mediador químico para la transferencia al ánodo de los electrones generados por la
30 pluralidad de bacterias.

De acuerdo con los ensayos experimentales revelados por los solicitantes del documento de patente US2008/0277273, empleando un voltaje de 0,5 V, el reactor produjo un total de 31,88 mL de gas, y de éste 30,76 mL fue hidrógeno gaseoso, lo que representó una pureza del 96.5%. Por su parte, la eficiencia del proceso, evaluada en términos del calor de combustión del gas de hidrógeno producido en comparación con la electricidad empleada (ambos en base a joules) fue del 334%. La eficiencia colúmbica del proceso, definida como el porcentaje de electrones recuperados del sustrato fue del 94%, mientras que según el contenido de energía del sustrato degradado durante una prueba (92%) y el calor de combustión del gas de hidrógeno producido, la eficiencia energética general del proceso fue del 93%. Finalmente, la densidad de corriente producida en el sistema es de 147 A/m³, mientras que la tasa de producción de gas de hidrógeno normalizada al volumen de líquido del reactor fue de 1640 litros de gas de hidrógeno por metro cúbico de reactor por día.

De otro lado, en los últimos años se han llevado estudios particulares para obtener hidrógeno a partir de la electrólisis de la urea presente en la orina. Entre estos se encuentra la investigación publicada en el artículo científico *Boggs, Bryan K, et al.; Urea electrolysis: direct hydrogen production from urine; Chemical communications, 2009, N° 32*, donde se divulga un proceso electroquímico que implica la electrólisis de la urea en un medio alcalino (KOH) para la producción de H₂. Los autores mostraron que es posible oxidar electroquímicamente la urea (a una concentración promedio de 0,33 M) empleando electrodos fabricados con metales de transición de bajo costo, como el níquel.

Así mismo, en el artículo científico *King, Rebecca L., et al.; Investigation of multimetal catalysts for stable hydrogen production via urea electrolysis; Journal of power sources, 2011, Vol. 196, N° 22*, se demostró que la electrólisis de urea es un método viable para la remediación de aguas residuales y la producción

simultánea de hidrógeno, señalando que si bien un catalizador de níquel de bajo costo resulta óptimo para la oxidación de urea en medio alcalino, resultaba necesario encontrar mecanismos para disminuir la obstrucción de la superficie y aumentar la baja densidad de corriente. En este sentido y de acuerdo con los resultados experimentales revelados por los autores, un electrodo multimetal RhNi permite reducir el sobrepotencial para la electrooxidación de urea, así como una mejora en la densidad de corriente en un factor de 200 en comparación con un catalizador de Ni.

- 10 Finalmente, en el documento de patente MX 2011/013384 (Diciembre 13, 2011) se divulga una celda electroquímica de generación de hidrógeno y oxígeno a partir de orina y/o sudor, la cual comprende un filtro para controlar la cantidad de amoníaco en la orina (donde dicho filtro comprende fibras, esponja, algodón, arena y carbón activado) y un núcleo conformado por un arreglo de placas de acero inoxidable y/o níquel (pudiéndose utilizar otros metales de transición) y una capa que detiene la espuma creada por la orina pero que permite el paso del hidrógeno y el oxígeno generados hacia el burbujeador.

- 20 Adicionalmente a dicha celda, se divulga un sistema contiguo a la misma para el abastecimiento/recirculación de la orina y/o sudor, el cual comprende un filtro secundario que se encarga de retener los residuos de la orina que se forman al llevarse a cabo la electrólisis en la celda.

- 25 De acuerdo con el solicitante de dicha patente MX 2011/013384, los aspectos clave del sistema desarrollado son la inclusión del filtro de control de amoníaco en la orina y del filtro para los residuos que la electrólisis de la orina y/o sudor produce en el núcleo de la celda, toda vez que estos permiten alargar considerablemente el periodo de mantenimiento de la unidad.

De acuerdo con todo lo anterior es claro que en el estado de la técnica se conocen diferentes estudios en los que se utiliza la orina como fuente de producción de hidrógeno mediante procesos de electrólisis, los cuales, sin embargo, presentan una serie de complicaciones relacionadas principalmente con la poca cantidad de materia orgánica presente en la orina, la inducción de reacciones secundarias indeseables que generan abundante espuma, lodos y otros gases contaminantes, y la necesidad de un proceso complejo de filtrado previo de la orina.

Visto lo anterior y teniendo en cuenta la gran relevancia del hidrógeno como parte del futuro energético en el mundo, es claro que en el estado de la técnica persistía la necesidad de desarrollar un sistema electroquímico optimizado para la obtención de hidrógeno de alta pureza sin necesidad de tratamientos previos exhaustivos a partir de moléculas orgánicas presentes en los excrementos.

Descripción general de la invención

En respuesta al problema técnico arriba descrito, en la presente solicitud de patente se revela un reactor electroquímico que produce hidrógeno a partir de dos reacciones que se llevan a cabo de manera separada: Una reacción de oxidación de moléculas orgánicas presentes en los excrementos, y una reacción de reducción de los iones hidronio (H_3O^+) presentes en el equilibrio químico del agua.

Dicho reactor está conformado por dos semiceldas que están separadas selectivamente por un sistema de membranas, y un sistema de puentes eléctricos que permite la formación de dos campos eléctricos perpendiculares entre sí, donde el campo eléctrico con dirección horizontal entre las dos semiceldas es mayor al campo eléctrico vertical generado dentro del ánodo, con una relación entre los mismos de (4:1).

Tomando la urea presente en la orina como molécula orgánica modelo, la reacción de oxidación genera iones hidronio sobre las placas anódicas, los cuales son atraídos por el puente eléctrico ubicado en el fondo del ánodo, y a su vez son atraídos por el puente eléctrico entre las dos semiceldas y las placas catódicas, lográndose que ocurra una transferencia de iones hidronio y moléculas de agua a través del sistema de membranas, y de esta manera establecer un balance experimental de carga y de materia.

Luego de esto, mientras que los iones hidronio que han sido transferidos se reducen sobre las placas catódicas para formar hidrógeno, por cuenta del principio de Le Châtelier el equilibrio químico se desplaza hacia el lado derecho, produciendo iones hidroxilo que, para compensar la pérdida de iones hidronio, se transportan por migración desde el cátodo hacia el ánodo pasando a través del sistema de membranas, con lo cual se favorece la cinética de reacción de la oxidación de la urea en medio básico.

El reactor aquí revelado permite disminuir el consumo energético para formar hidrógeno de una manera significativa en comparación con las celdas electrolíticas que utilizan agua en medio alcalino, lo anterior debido a que las moléculas orgánicas presentan un potencial de oxidación menor que el del agua y porque la reacción catódica planteada utiliza el equilibrio químico del agua, de manera que una vez formado el hidrógeno sobre el cátodo, de manera espontánea se forman iones hidroxilo y se compensan los iones hidronio previamente consumidos.

Así mismo, la configuración del reactor electroquímico aquí revelado permite producir hidrógeno de alta pureza sin la necesidad de tratamientos previos exhaustivos de la materia prima a oxidar (moléculas orgánicas presentes en los excrementos), y logrando niveles estables de producción de hidrógeno hasta el agotamiento de dicha materia prima al interior de la celda de reacción.

Descripción de las Figuras

La **FIGURA 1** es un diagrama completo del reactor, el cual incluye: (1.1) Las dos
semiceldas (semicelda anódica a la izquierda, semicelda catódica a la derecha) y,
5 (1.2) el sistema de membranas;

La **FIGURA 2** es un diagrama de la semicelda anódica en particular, donde se
muestra la disposición de las diferentes placas anódicas que hacen parte de la
configuración del sistema;

10

La **FIGURA 3** es un diagrama de la semicelda catódica en particular, donde se
muestra la disposición de las diferentes placas catódicas que hacen parte de la
configuración del sistema;

15 La **FIGURA 4** es una representación general de los campos eléctricos que afectan
al sistema, uno con orientación horizontal (E1) y otro con orientación vertical (E2).

La **FIGURA 5** muestra los movimientos de las cargas negativas y positivas a
través del sistema de membranas, de acuerdo con los campos eléctricos.

20

Descripción detallada de la invención

Adicionalmente a lo planteado previamente, el objeto de la presente solicitud
podrá ser apreciado en detalle mediante la subsiguiente descripción del reactor
desarrollado:

25

De conformidad con la Figura 1, el reactor aquí revelado consiste en una celda
electrolítica que tiene el ánodo y el cátodo separados y conectados materialmente
de una forma selectiva para que algunas de las especies formadas en el proceso
30 de oxidación en el ánodo (iones hidronio) puedan transferirse a través de un

sistema de membranas (1.2) y reaccionen en el cátodo, mientras que los iones hidroxilos formados en el cátodo como resultado del equilibrio químico del agua se transporten por migración al ánodo y así se establezca un balance de materia y carga.

5

De manera específica y de acuerdo con la figura 2, el ánodo está formado por 32 placas metálicas (2.1) ubicadas en el centro de la semicelda, las cuales entran en contacto con la superficie que contiene el sistema de membranas (1.2) para disminuir la distancia a las placas catódicas. Dicha configuración permite que la densidad de carga negativa se dé hacia la región superior de la semicelda, y que las cargas positivas estén centradas hacia la zona inferior.

En una realización particular de la invención, las placas metálicas principales (2.1) en el ánodo son 8, las cuales pueden ser fabricadas en acero inoxidable 316 L y pueden tener una forma rectangular de 6cm x 12 cm.

En otra realización particular de la invención, la distancia de separación entre las placas auxiliares y el puente anódico (2.2) es de 0,5 cm.

Por su parte y tal como se observa en la Figura 3, el cátodo está compuesto por un puente metálico (3.3) ubicado en el fondo de la semicelda, el cual está conectado al puente anódico (2.2) mediante un tornillo de acero inoxidable por medio de una pata en forma de L, y donde el tornillo debe estar por fuera del sistema líquido.

25

En el reactor aquí revelado las placas catódicas se dividen en dos grupos: dos placas auxiliares (3.2) que se ubican en las caras de la semicelda y 30 placas principales (3.1) que están centradas en el cuerpo de la semicelda. Esta configuración permite que, por ejemplo, iones hidronio pasen del ánodo hacia el

cátodo por migración y se muevan desde la parte inferior del cátodo hacia la parte superior del mismo, y desde la entrada del cátodo hacia el fondo del mismo.

Ahora bien, de conformidad con la Figura 4, el sistema de puentes eléctricos (2.2, 3.3) que hacen parte del reactor aquí revelado están diseñados para formar dos campos eléctricos (E1 - E2) perpendiculares entre sí, siendo el campo eléctrico con dirección horizontal entre las dos semiceldas mayor al campo eléctrico perpendicular generado dentro del ánodo, con una relación (4:1).

Adicionalmente resulta pertinente señalar que, desde el punto de vista eléctrico, las dos semiceldas (1.1) que conforman el reactor revelado tienen una configuración de dos resistencias en serie, con lo cual se logra controlar el potencial de cada compartimento de manera independiente y complementaria a través del ajuste de la conductividad de las disoluciones en cada una de las semiceldas.

En una realización particular de la invención, los valores de potencial adecuados ánodo: cátodo son 1V:2,5V.

Ahora bien, el reactor aquí revelado está diseñado para producir hidrógeno a partir de reacciones de oxidación por electrólisis de las moléculas orgánicas presentes en los excrementos, las cuales se dan de manera separada a la reacción de reducción de los iones hidronio presentes y formados en el equilibrio químico del agua. Para dicho fin, en ambos compartimentos (catódico y anódico) se disponen placas de acero inoxidable que actúan como electrodos (2.1 y 3.1) y puentes eléctricos (2.2 y 3.3).

Las condiciones del reactor implican que en el ánodo están los excrementos homogenizados, mientras que en el cátodo hay agua y cantidades pequeñas de un electrolito conductor. Por su parte, el sistema de membranas (1.2) que separa a

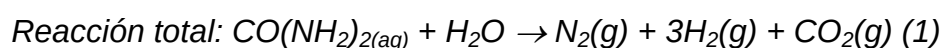
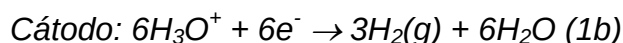
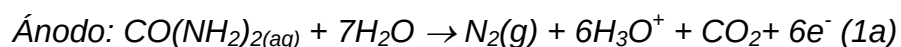
las dos semiceldas (1.1) está compuesto por una membrana de intercambio protónico de nafi3n combinada con una membrana genérica (película estirable o stretch film, membrana elástica polimérica de polietileno lineal de baja densidad con un tamaño de poro aproximado de 30 Å) o de intercambio aniónico.

5

En una realización particular de la invención, el electrolito conductor presente en el cátodo es ácido fosfórico (H₃PO₄).

Al utilizar la urea presente en la orina como molécula orgánica modelo, se tiene que su oxidación genera en el ánodo iones hidronio (*ver semi-reacción 1a*), los cuales, una vez formados, son atraídos por el puente eléctrico ubicado en el fondo del ánodo (*campo eléctrico E²*) y a su vez son atraídos por el puente y las placas catódicas E¹ (*Figuras 4 y 5*), haciendo que ocurra transferencia de iones hidronio y moléculas de agua a través de la membrana de nafi3n. Dicha transferencia hace que en el sistema se establezca un balance experimental de carga y de materia.

15



20

Ya en el cátodo, los iones hidronio se reducen sobre las placas catódicas (*semi-reacción 1b*) formando hidrógeno gaseoso (H₂), luego de lo cual, y por el principio de *Le-Châtelier*, el equilibrio químico se desplaza hacia el lado derecho produciendo iones hidroxilo y compensando la pérdida de iones hidronio.

25

Finalmente, parte de los iones hidroxilo se transportan por migración desde el cátodo hacia el ánodo pasando por la membrana genérica que hace parte del sistema de membranas, facilitando la cinética de la reacción de oxidación de la urea en medio básico.

30

El reactor aquí revelado permite disminuir significativamente el consumo energético requerido para producir hidrógeno a partir del proceso de oxidación de la materia orgánica presente en los excrementos. De esta manera, la aplicación de dicha tecnología permite oxidar la materia orgánica presente en los excrementos, generando lodos y pocas cantidades de gases (nitrógeno y dióxido de carbono), pero permitiendo aprovechar la energía para formar hidrógeno gaseoso.

Dicho proceso acarrea diferentes ventajas, dentro de las cuales se incluyen:

1. Disminuir la contaminación de las aguas por el aprovechamiento de la energía que contienen los excrementos;
2. Disminuir la contaminación causada a la atmósfera por los gases de efectos nocivos que produce la combustión de los motores a explosión que utilizan hidrocarburos, impulsando el uso de la tecnología del hidrógeno como combustible sin cambiar la tecnología de los motores a explosión actuales; y,
3. Disminuir el costo para producir hidrógeno puesto que la materia prima son los excrementos y la energía aplicada es inferior a otras tecnologías.

20

El reactor revelado utiliza energía eléctrica para realizar dos procesos químicos por separado, de maneras que los procesos de oxidación y reducción se realizan en un compartimiento de manera separada selectivamente pero no aislada eléctricamente, mientras que para compensar la corriente del sistema se utiliza un puente eléctrico en acero inoxidable capaz de aumentar la producción de hidrogeno en el cátodo.

25

El sistema de puentes eléctricos (2.2 y 3.3) que hacen parte del reactor aquí revelado puede eventualmente ser suspendido debido a que el sistema de membranas (1.2) es capaz de funcionar al mismo tiempo como puente eléctrico, lo

30

anterior a pesar de que ocurriría una disminución en la corriente aplicada (energía aplicada a un determinado potencial) como resultado de un aumento en la resistencia del sistema, con la consecuente disminución de la cantidad de hidrogeno generado (energía producida en forma de hidrogeno).

5

Ahora bien, cuando el sistema se conecta a una fuente externa, las placas centrales del ánodo (2.1) se cargan positivamente y el puente de la parte inferior se carga negativamente. Por su parte, el puente del ánodo (2.2) está conectado al puente del cátodo (3.3), y aunque dicha placa está cargada ligeramente de una manera negativa las placas centrales del cátodo (3.1) se cargan más fuertemente puesto que están conectadas directamente a la fuente y por esta razón los iones hidronio se mueven de la forma descrita en la figura 5.

Cabe resaltar que para que se presente una corriente eléctrica deben fluir cargas en ambos sentidos, razón por la cual una vez el sistema consume hidronios en el cátodo por equilibrio químico genera iones hidroxilo (incrementándose su densidad en dicho compartimiento), los cuales por migración son transportados hacia el ánodo en donde se han dispuesto placas auxiliares en sus áreas laterales para mejorar la dinámica interna del sistema puesto que incrementa la densidad de cargas negativas en estos sitios, mientras que en el centro y en el área inferior existe una densidad mayor de protones, facilitando por ende el flujo protónico.

El reactor aquí revelado aprovecha la energía que contienen las moléculas oxidables de los excrementos, y a pesar de que sigue requiriéndose energía externa para transportar las cargas a través de las membranas, el potencial que debe aplicarse para electrolizar las moléculas de agua es de -1,23 V, mientras que para electrolizar moléculas de urea es de -0,37 V. Por otro lado, la reacción de equilibrio químico en el cátodo es espontánea (esto es, requiere de 0,00 V), obteniéndose por tanto eficiencias eléctricas superiores al 100%.

30

Ejemplo

Con el fin de mostrar el funcionamiento y ventajas del reactor de acuerdo con la presente invención, a continuación se presenta un ejemplo comparativo entre una
5 celda convencional y dicho novedoso reactor.

En este sentido, mientras que en las celdas convencionales que utilizan agua las reacciones de oxidación y reducción se realizan en un mismo compartimiento (razón por la cual generan normalmente un máximo de 66% de H_2 y de 34% de
10 O_2), cuando se utiliza el sistema revelado en la presente invención se obtienen porcentajes de hidrogeno mayores al 90%.

Por su parte, el consumo energético en forma de corriente eléctrica es mucho mayor cuando se utilizan los sistemas convencionales debido a que el potencial
15 que se requiere para electrolizar la molécula del agua es 3,32 veces mayor que para electrolizar una molécula orgánica como la urea. Ahora, si bien pueden emplearse celdas convencionales para electrolizar orina, las reacciones se realizan en un solo compartimiento presentándose reacciones indeseables como la formación de espuma y formación de óxidos de nitrógeno, lo cual hace disminuir
20 el porcentaje de hidrogeno y aumenta el consumo energético.

Contrario a lo anterior, los procesos que se presentan en el reactor aquí revelado permiten disminuir el consumo energético para formar hidrógeno de una manera significativa en comparación con las celdas convencionales que utilizan agua en
25 medio alcalino. Específicamente, los cálculos iniciales indican que el consumo energético del reactor de la presente invención corresponde a un 25% del consumo energético de las celdas convencionales, disminución que obedece a que la moléculas orgánicas como la urea tienen un bajo potencial de oxidación y que la reacción catódica utiliza el equilibrio químico del agua, de manera que una

vez formado el hidrógeno y gracias al principio de LChatelier se forman espontáneamente iones hidroxilo que compensan lo iones hidronio consumidos.

De esta manera, empleando el reactor aquí revelado ha sido posible obtener hasta
5 un 92% de hidrógeno puro con flujos hasta de 40 L/h aplicando una energía eléctrica equivalente a 14 V y 2 A de corriente eléctrica.