

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 890 988**

51 Int. Cl.:

C25B 1/04 (2011.01)

C25B 9/23 (2011.01)

C25B 9/77 (2011.01)

C25B 11/081 (2011.01)

C25B 11/097 (2011.01)

C25B 13/02 (2006.01)

C25B 13/08 (2006.01)

H01M 4/88 (2006.01)

H01M (2006.01)

H01M 8/1018 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.12.2017** **PCT/GB2017/053775**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.06.2018** **WO18115821**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.12.2017** **E 17818237 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.07.2021** **EP 3559314**

54 Título: **Membrana revestida con catalizador que tiene una estructura estratificada**

30 Prioridad:

22.12.2016 GB 201621963

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

25.01.2022

73 Titular/es:

JOHNSON MATTHEY FUEL CELLS LIMITED
(100.0%)
5th floor ,25 Farringdon Street
London EC4A 4AB, GB

72 Inventor/es:

PRICE, EMILY ROSE y
WRIGHT, EDWARD ANTHONY

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 890 988 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Membrana revestida con catalizador que tiene una estructura estratificada

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere generalmente a membranas revestidas con catalizador que tienen una estructura estratificada y, en particular, para su uso en electrolizadores de agua.

10 **Antecedentes de la técnica**

La electrólisis del agua, para producir hidrógeno y oxígeno de alta pureza puede llevarse a cabo tanto en sistemas electrolíticos alcalinos como ácidos y los dispositivos prácticos que usan ambos tipos de sistemas electrolíticos existen como productos comerciales. Los electrolizadores basados en electrolitos ácidos usan típicamente una solid proton-conducting polymer electrolyte membrane (membrana sólida electrolítica polimérica conductora de protones - PEM) y se denominan polymer electrolyte membrane water electrolyzers (electrolizadores de agua con membrana electrolítica polimérica - PEMWE). Se emplea una catalyst-coated membrane (membrana revestida con catalizador - CCM) dentro de la celda de una PEMWE que comprende la PEM con dos capas de catalizador (para las reacciones anódica y catódica) aplicadas en cualquiera de las caras de la PEM. Para completar la celda de electrólisis, los colectores de corriente, que normalmente son mallas metálicas, se colocan a ambos lados de la CCM.

Aunque para obtener una operación eficaz y máximo rendimiento de una PEMWE es importante mantener la resistencia electrónica e iónica a través de la CCM lo más baja posible, es incluso más importante minimizar el posible paso de hidrógeno a través de la membrana hacia la corriente de oxígeno. Tradicionalmente, el medio para minimizar esta resistencia iónica y eléctrica y mejorar el rendimiento de la PEMWE es reducir el espesor de la PEM tanto como sea posible, pero puesto que el paso de hidrógeno se agrava por el uso de una membrana delgada en las PEMWE, es bastante habitual usar membranas caras con espesores mayores que 100 μm y, típicamente de aproximadamente 200 μm . En un electrolizador, el cátodo también se conoce como el electrodo de hidrógeno y es el electrodo en el que se genera hidrógeno; el ánodo también se conoce como el electrodo de oxígeno y es el electrodo en el que se genera oxígeno. El resultado de cualquier paso excesivo de hidrógeno es una combinación de H_2 molecular y O_2 molecular en el lado del ánodo, que es una mezcla potencialmente explosiva que presenta un riesgo significativo de seguridad, debido al amplio intervalo explosivo de 5-95 % de H_2 en O_2 .

Por lo tanto, aunque se obtendría mayor rendimiento mediante el uso de una PEM más delgada en la PEMWE, en la práctica esto no ha sido posible debido al aumento del paso de hidrógeno y al riesgo de seguridad resultante. Tradicionalmente, el espesor de la PEM en las PEMWE es mayor que 100 μm (por ejemplo, se usan Nafion™ N115 (espesor 127 μm) o Nafion™ N117 (espesor 183 μm) para reducir el nivel de paso de hidrógeno, pero el incremento concomitante en la resistencia iónica limita severamente el rendimiento de la PEMWE.

Puede observarse que existe la necesidad de una PEM de alto rendimiento que limite simultáneamente el paso de hidrógeno para reducir el riesgo de seguridad en estas aplicaciones. Por "rendimiento alto" se entiende que la PEMWE puede funcionar a una densidad de corriente lo más alta posible, con una eficiencia eléctrica lo más alta posible (es decir, tensión de celda baja).

La presente invención aborda este problema y al hacerlo proporciona una CCM que es útil en aplicaciones de electrolizadores de agua con PEM.

Descripción de la invención

Un primer aspecto de la invención es una catalyst-coated membrane (membrana revestida con catalizador - CCM) para un electrolizador de agua, que tiene una estructura estratificada que comprende:

- una primera capa que comprende un primer componente de membrana, teniendo el primer componente de membrana una capa de catalizador catódico dispuesta sobre una primera cara del mismo;
- una segunda capa que comprende un segundo componente de membrana, teniendo el segundo componente de membrana una capa de catalizador anódico dispuesta sobre una primera cara del mismo; y
- una capa intermedia dispuesta entre la primera y segunda capas, que comprende un tercer componente de membrana, teniendo el tercer componente de membrana una capa de catalizador de recombinación dispuesta sobre una primera cara del mismo.

en donde las segundas caras del primer y segundo componentes de membrana están orientadas hacia la capa intermedia.

Dicha CCM ofrece un mejor rendimiento en un electrolizador de agua (debido a la baja resistencia iónica a través de la CCM) así como un menor riesgo de seguridad debido a un menor paso de hidrógeno. Adicionalmente, la CCM es de alta calidad (es decir, puede producirse con alta reproducibilidad y consistencia, y con mínimos defectos) y puede fabricarse de manera más eficaz. Los motivos de esto son los siguientes.

Se conoce el uso de una capa que comprende un catalizador (un catalizador de recombinación) que tiene la capacidad de reaccionar catalíticamente con cualquier exceso de hidrógeno que pase desde el ánodo con oxígeno desde el cátodo de manera controlada para formar agua dentro de una celda de combustible con PEM, por ejemplo, de EP-1 833 112 A2, US-2002/058172 A1 y US-5 472 799 A. El propósito de dichas capas en celdas de combustible es ayudar a hidratar la membrana para mantener la conductividad de protones. Esto es necesario en las celdas de combustible que funcionan en algunas condiciones porque los reactivos de entrada son hidrógeno y oxígeno gaseosos, y la cantidad de agua líquida presente es mínima.

En una PEMWE, dichas técnicas para mantener la membrana hidratada son en principio innecesarias porque el reactivo de entrada es agua líquida, que fluye por ambos lados de la celda electrolítica garantizando una buena hidratación de la REM en todo momento. Por lo tanto, parecería que no hay necesidad de incorporar una capa de catalizador hidratante adicional dentro de la PEM de un electrolizador de agua.

A pesar de esto, se ha descubierto que la presencia de una capa de catalizador de recombinación dentro de la PEM de una PEMWE produce una reducción significativa en el paso de hidrógeno hacia el lado del electrodo anódico de la CCM. Por lo tanto, el uso de la CCM de la presente invención en una PEMWE proporciona menor resistencia, mayor rendimiento y menor riesgo de que se forme una mezcla explosiva en el lado anódico de la celda.

WO2015/074637 A1 también aborda el problema del paso de hidrógeno en una celda de electrólisis. El paso de hidrógeno se reduce al incluir al menos un electrodo adicional dentro del electrolito entre el ánodo y el cátodo, donde el electrodo adicional está conectado al ánodo o cátodo por medio de una fuente de tensión CC adicional. US-2014/0116877 A1 describe una membrana-electrode assembly (unidad membrana-electrodo - MEA) para un dispositivo de electrólisis para producir hidrógeno mediante electrólisis de agua. La MEA comprende una primera, segunda y tercera capas de intercambio de protones, estando el cátodo fijado a la primera capa de intercambio de protones y estando el ánodo fijado a la tercera capa de intercambio de protones, un primer catalizador dispuesto entre la primera y segunda capas de intercambio de protones, un segundo catalizador dispuesto entre la segunda y tercera capas de intercambio de protones.

Las CCM para usar en celdas de combustible que incorporan una capa de catalizador de recombinación dentro de la membrana (tales como las descritas en US-2002/0058172 A1) se producen típicamente mediante el revestimiento de una capa de catalizador de recombinación sobre una cara de un componente de membrana y estratificando un segundo componente de membrana, de manera que la capa de catalizador de recombinación queda intercalada entre los dos componentes de membrana. Después, las capas de catalizador anódico y catódico se aplican típicamente a cada una de las caras opuestas de la membrana resultante para formar la CCM.

Tales CCM son difíciles de producir y típicamente de baja calidad. Para producir dichas CCM, un primer componente de membrana delgada soportado sobre una capa de soporte se reviste por su cara expuesta con un catalizador de recombinación. Este primer componente de membrana se estratifica a continuación con un segundo componente de membrana también soportado sobre una capa de soporte para proporcionar una membrana estratificada (los dos componentes de membrana se disponen de manera que el catalizador de recombinación queda intercalado entre los dos componentes de membrana). Se retira una de las capas de soporte y se aplica una capa de catalizador (ya sea de ánodo o cátodo) a la cara expuesta de la membrana laminada. Después, se retira la segunda capa de soporte y se aplica una segunda capa de catalizador (ya sea de cátodo o ánodo) a la segunda cara de la membrana estratificada. Esto no es sencillo y ocasiona problemas de control de calidad, ya que cuando se retira una membrana delgada revestida de la película portadora de soporte para revestir la otra cara, la inevitable distorsión de la membrana hace muy difícil el revestimiento adicional de la cara opuesta. El resultado es que al añadir cualquier revestimiento adicional a la membrana, la carga del catalizador metálico del grupo platino en la membrana es difícil de controlar. El revestimiento debe realizarse lentamente lo que reduce la eficacia de producción.

Además, el revestimiento frecuentemente se consigue mediante una etapa de transferencia térmica de una capa de catalizador, formada sobre una película portadora, a la membrana, lo que produce distorsión de las membranas delgadas.

Por el contrario, la CCM según la invención se puede producir mediante revestimiento directo de una capa de catalizador sobre una sola cara de cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana, seguido por la estratificación de los tres componentes de membrana catalizada sin ninguna etapa de revestimiento adicional para proporcionar la CCM de la invención. Como resultado, no surgen problemas de control de calidad derivados de la aplicación de un segundo revestimiento catalizador sobre la cara opuesta de un componente de membrana dado y puede producirse una CCM de muy alta calidad.

Dado que cada componente de membrana está revestido por una sola cara y que se ha minimizado la distorsión de la membrana, pueden usarse componentes de membrana muy delgados, lo que reduce de este modo la resistencia iónica a través de la CCM final y mejora el rendimiento. Al mismo tiempo, la presencia de la capa de catalizador de recombinación reduce el paso de hidrógeno que de otro modo estaría presente en una CCM delgada y se minimiza el riesgo de explosión durante el uso.

Por lo tanto, se puede observar que la CCM de la invención es de alta calidad, se puede producir eficazmente y tiene propiedades mejoradas, incluidas resistencia iónica reducida, operación más eficiente del electrolizador y riesgo reducido de paso de hidrógeno.

Un segundo aspecto de la invención es el uso de la membrana revestida con catalizador según el primer aspecto como una CCM dentro de un electrolizador de agua.

Dicho uso de la CCM según el primer aspecto proporciona un electrolizador de agua de rendimiento mejorado y seguridad mejorada.

Un tercer aspecto de la invención es un método para fabricar la membrana revestida con catalizador del primer aspecto que comprende:

- proporcionar un primer componente de membrana, teniendo dicho primer componente de membrana una capa de catalizador catódico dispuesta sobre en una primera cara del primer componente de membrana;

- proporcionar un segundo componente de membrana, teniendo dicho segundo componente de membrana una capa de catalizador anódico dispuesta sobre una primera cara del segundo componente de membrana;

- proporcionar un tercer componente de membrana, teniendo dicho tercer componente de membrana una capa de catalizador de recombinación dispuesta sobre una primera cara del tercer componente de membrana; y

- estratificar el primer, segundo y tercer componentes de membrana juntos para formar una membrana revestida con catalizador que tiene una estructura estratificada, de manera que el tercer componente de membrana se dispone entre el primer y segundo componentes de membrana dentro de la estructura estratificada.

En donde las segundas caras del primer y segundo componentes de membrana de la estructura estratificada están orientadas hacia la capa intermedia.

De este modo se puede producir una CCM como se ha descrito anteriormente según el primer aspecto. En particular, la provisión de tres componentes de membrana revestidos independientemente que se estratifican posteriormente juntos en el método del tercer aspecto permite que la carga del catalizador se controle más estrechamente, permite el uso de componentes de membrana más delgados y mejora la eficacia del proceso de producción. El catalizador de recombinación del tercer componente de membrana reduce el paso de hidrógeno a través de la CCM.

Un cuarto aspecto de la invención es una membrana revestida con catalizador obtenida por un método según el tercer aspecto. Debido a la provisión de tres componentes de membrana, llevando cada uno independientemente catalizadores, dicha CCM es de mayor calidad, por las razones anteriormente explicadas. Un cuarto aspecto de la invención es una membrana revestida con catalizador que se puede obtener por un método según el tercer aspecto.

Un quinto aspecto de la invención es un electrolizador de agua que comprende la membrana revestida con catalizador según el primer aspecto.

Un sexto aspecto de la invención es un método para generar gas de hidrógeno que comprende las etapas de electrolizar agua mediante el uso de un electrolizador de agua según el quinto aspecto, y generar gas de hidrógeno.

Cualquier subtítulo de la presente descripción se incluye solo por comodidad, y no debe interpretarse como limitante de la descripción en forma alguna.

Opciones y preferencias adicionales

Membrana revestida con catalizador

La CCM de la invención tiene una estructura estratificada, es decir, está construida a partir de un conjunto de múltiples capas individuales, es decir, la primera capa, la segunda capa y la capa intermedia. Cada una de estas capas comprende un componente de membrana, teniendo cada uno de los cuales una capa de catalizador dispuesta sobre una primera cara del mismo. En algunas realizaciones, cada uno de los tres componentes de membrana tiene la capa de catalizador dispuesta sobre una primera cara pero no tiene ninguna capa de catalizador u otro aditivo dispuesta sobre la segunda (es decir, la otra) cara.

En algunas realizaciones, cada una de la primera y segunda capas están adyacentes a la capa intermedia, colocada en cada una de las caras opuestas de la capa intermedia. Por “adyacente a la capa intermedia” se entiende que la primera y la segunda capas están en contacto con la capa intermedia dentro de la estructura estratificada, sin que haya otras capas presentes entre la capa intermedia y la primera y la segunda capas, respectivamente.

En algunas realizaciones, la CCM consiste en la primera capa, la segunda capa y la capa intermedia. Por lo tanto, en algunas realizaciones, la CCM tiene una estructura de tres capas en la cual las capas externas son la primera y segunda capas y la capa interna es la capa intermedia, sin capas adicionales presentes.

Sin embargo, se prevé que pueden estar presentes capas adicionales dentro de la estructura estratificada de CCM, siempre que las propiedades de la CCM no se vean comprometidas por la presencia de dichas capas.

Las segundas caras del primer y segundo componentes de membrana están orientadas hacia la capa intermedia. En otras palabras, el primer y segundo componentes de membrana están orientados de manera que las capas de catalizador dispuestas en sus primeras caras no estén en contacto con la capa intermedia (es decir, las segundas caras de cada uno del primer y segundo componentes de membrana estén en contacto con la capa intermedia).

En algunas realizaciones, la CCM tiene una estructura de tres capas en la cual las capas exteriores son la primera y segunda capas y la capa interior es la capa intermedia, estando cada una de la segunda cara de la primera capa y la segunda cara de la segunda capa orientadas hacia dentro, hacia la capa intermedia.

De esta manera, se proporciona una CCM que está lista para incorporarse a un electrolizador mediante la adición de capas colectoras de corriente a cada lado.

En algunas realizaciones, la distancia entre la capa de catalizador de recombinación de la capa intermedia y la capa de catalizador catódico de la primera capa dentro de la CCM general de la invención es mayor que la distancia entre la capa de catalizador de recombinación de la capa intermedia y la capa de catalizador anódico de la segunda capa. En la presente descripción, “distancia” se refiere a la distancia medida a través del espesor de la CCM desde el centro de una capa de catalizador hasta el centro de una capa de catalizador adyacente.

De esta manera, durante el uso, la capa de catalizador de recombinación de la capa intermedia dentro de la CCM se encuentra más cerca de la capa de catalizador anódico que la capa de catalizador catódico. Esto es ventajoso porque el hidrógeno tiene un índice de difusión más alto a través de la PEM que el oxígeno, de manera que las cantidades relativas de hidrógeno y oxígeno necesarias para una recombinación eficiente estarán presentes en un plano dentro de la CCM más cercano a la capa de catalizador anódico que a la capa de catalizador catódico. Por lo tanto, la recombinación de H_2 y O_2 es más eficaz cuando la ubicación del catalizador de recombinación se selecciona adecuadamente para que esté en o cerca de este plano.

En algunas realizaciones, la distancia entre la capa de catalizador recombinante y la capa de catalizador catódico dentro de la CCM es al menos 1,5 veces mayor que la distancia entre la capa de catalizador recombinante y la capa de catalizador anódico, por ejemplo, al menos 1,6 veces, al menos 1,7 veces, al menos 1,8 veces o al menos 1,9 veces. En algunas realizaciones, la distancia entre la capa de catalizador de recombinación y la capa de catalizador catódico dentro de la CCM es 2,0 veces la distancia entre la capa de catalizador de recombinación y la capa de catalizador anódico.

Cuando se usan tres componentes de membrana de igual espesor en la preparación del estratificado, esta colocación de la capa de catalizador de recombinación se puede conseguir al establecer la orientación de la capa intermedia dentro de la CCM.

De forma adicional o alternativa, esta colocación de la capa de catalizador de recombinación de la capa intermedia se puede conseguir ajustando los espesores relativos de los tres componentes de membrana.

En algunas realizaciones, una segunda cara del tercer componente de membrana es adyacente a una segunda cara del primer componente de membrana, de manera que la capa de catalizador de recombinación se dispone adyacente a la segunda capa.

En otras palabras, la capa intermedia puede orientarse de manera que la capa de catalizador de recombinación dentro de la estructura estratificada esté más cerca del segundo componente de membrana que lleva la capa de catalizador anódico que el primer componente de membrana que lleva la capa de catalizador catódico.

Así, la capa de catalizador de recombinación puede colocarse en una posición más cercana a la capa de catalizador anódico al ajustar la orientación del tercer componente de membrana, por las razones descritas anteriormente.

En algunas realizaciones, el espesor total de la membrana revestida con catalizador de la invención es $\leq 120 \mu\text{m}$ (es decir, no mayor que $120 \mu\text{m}$), por ejemplo, $\leq 100 \mu\text{m}$, por ejemplo, $\leq 95 \mu\text{m}$, no $\leq 90 \mu\text{m}$, $\leq 85 \mu\text{m}$, $\leq 80 \mu\text{m}$, $\leq 75 \mu\text{m}$, $\leq 70 \mu\text{m}$, $\leq 65 \mu\text{m}$ o $\leq 60 \mu\text{m}$.

5 Así se logra una resistencia muy baja al transporte de iones a través de la CCM al mismo tiempo que la presencia del catalizador de recombinación evita el paso de hidrógeno. En otras palabras, se proporciona una CCM muy segura de alto rendimiento.

10 En algunas realizaciones, el espesor total de la membrana revestida con catalizador es al menos $20 \mu\text{m}$, por ejemplo, al menos $25 \mu\text{m}$, al menos $30 \mu\text{m}$, al menos $35 \mu\text{m}$, al menos $40 \mu\text{m}$ o al menos $50 \mu\text{m}$. Así, la CCM no es tan delgada como para tener el riesgo de que los niveles de paso de hidrógeno aumenten a pesar de la presencia de la capa de catalizador de recombinación.

15 En algunas realizaciones, el espesor total de la membrana revestida con catalizador es de 20 a 120 , por ejemplo, de 25 a $100 \mu\text{m}$, de 30 a $90 \mu\text{m}$, de 35 a $85 \mu\text{m}$, de 40 a $80 \mu\text{m}$, de 45 a $75 \mu\text{m}$. En algunas realizaciones, el espesor total de la membrana revestida con catalizador es aproximadamente $60 \mu\text{m}$.

20 En algunas realizaciones, el espesor total de la membrana revestida con catalizador está en el intervalo de 50 a $70 \mu\text{m}$, por ejemplo, de 55 a $65 \mu\text{m}$.

En algunas realizaciones, se proporciona una membrana revestida con catalizador que es un estratificado que consiste en las siguientes capas, en orden:

- 25 - (a) una capa de catalizador catódico que comprende un catalizador catódico;
- (b) un primer componente de membrana;
- (c) un tercer componente de membrana;
- 30 - (d) una capa de catalizador de recombinación que comprende un catalizador de recombinación;
- (e) un segundo componente de membrana; y
- (f) una capa de catalizador anódico que comprende un catalizador anódico.

35 Primer, segundo y tercer componentes de membrana

En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden un ionómero. En algunas realizaciones, cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden un ionómero.

40 En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana son componentes de membrana electrolítica polimérica sólida que comprenden un ionómero. En algunas realizaciones, cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana son componentes de membrana electrolítica polimérica sólida que comprenden un ionómero.

45 En algunas realizaciones, el ionómero es un fluoropolímero sulfonado, tal como un ionómero de perfluorinated sulphononic acid (ácido sulfónico perfluorado - PFSA), o polímero parcialmente fluorado. Dichos polímeros funcionan bien en un electrolizador. En algunas realizaciones, el fluoropolímero sulfonado es un PFSA seleccionado de p. ej. Nafion™ (Chemours Company), Aquivion® (Solvay Specialty Polymers), Flemion™ (Asahi Glass Group) y Aciplex™ (Asahi Kasei Chemicals Corp).

50 En algunas realizaciones, el ionómero es un ionómero de hidrocarburo sulfonado, tal como los comercializados por FuMA-Tech GmbH como la serie de productos fumapem® P, E o K, JSR Corporation, Toyobo Corporation, y otros.

55 En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden una mezcla de ionómeros, por ejemplo, una mezcla de un ionómero de PFSA y un ionómero de hidrocarburo sulfonado o una mezcla de dos o más ionómeros de PFSA de peso equivalente (PEq) diferente.

60 En algunas realizaciones, cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden el mismo ionómero o mezcla de ionómeros.

En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden una composición ionomérica diferente a los otros componentes de membrana. Por ejemplo, el primer y tercer componentes de membrana comprenden un PFSA de pesos equivalentes (PEq) diferentes.

65

En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo o tercer componentes de membrana comprende un componente de refuerzo incluido en el componente de membrana. En algunas realizaciones, cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprende dicho componente de refuerzo.

- 5 El componente de refuerzo puede comprender uno o más componentes de refuerzo planos que proporcionan soporte estructural al componente de membrana aumentando de este modo la resistencia mecánica y permiten usar un componente de membrana más delgado.

- 10 El componente de refuerzo puede comprender cualquier material adecuado que proporcione soporte estructural sin interferir con las propiedades de transporte de iones de la CCM. Los componentes de refuerzo planos adecuados incluyen, aunque no de forma limitativa, los formados a partir de estructuras de nanofibras (por ejemplo, formadas por electrohilado o hilado forzado), los formados a partir de redes poliméricas expandidas (p. ej., PTFE expandido (e-PTFE)) y los formados por diseño de una estructura plana no porosa. Los ejemplos de materiales adecuados para usar en la formación del componente de refuerzo plano son típicamente poliméricos e incluyen politetrafluoroetileno (PTFE), difluoruro de polivinilideno (PVDF), poliéteréter cetona (PEEK), poliimida (PI), poliéterimida, polibencimidazol (PBI), polietersulfona (RES), poliaramida y polipropileno (PP) o mezclas o combinaciones de los mismos.

- 20 En algunas realizaciones, la capa de refuerzo comprende e-PTFE. Usualmente, dicha capa de refuerzo se introduce en el componente de membrana durante la fabricación, primero al colar una capa de ionómero sobre una lámina de soporte a partir de una dispersión líquida, aplicar un componente de refuerzo tal como PTFE sobre la capa de ionómero húmeda y colar otra capa de ionómero para conformar el componente de membrana acabado, formando así un componente de membrana con un refuerzo integral de e-PTFE.

- 25 En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden un aditivo de eliminación de peróxido de hidrógeno, tal como un catalizador de descomposición de peróxido de hidrógeno o un aditivo depurador de radicales peróxido. En algunas realizaciones, cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprende un aditivo de eliminación de peróxido de hidrógeno o un aditivo depurador de radicales peróxido.

- 30 Un problema común durante el funcionamiento de los electrolizadores de agua es que el hidrógeno y el oxígeno experimentan una reacción secundaria no deseada para formar peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que, a su vez, se descompone para formar radicales peróxido. Estos radicales son muy reactivos y atacan los componentes de la membrana y otras estructuras dentro del electrolizador, reduciendo la vida útil del dispositivo.

- 35 La incorporación de un aditivo de eliminación de peróxido de hidrógeno o un aditivo depurador de radicales peróxido dentro de uno o más de los componentes de membrana sirve para eliminar estos radicales peróxido, por ejemplo, descomponiendo el peróxido de hidrógeno en productos benignos o eliminando los radicales después de su formación, protegiendo así los componentes de la membrana de la degradación y aumentando la vida útil del dispositivo.

- 40 El aditivo de eliminación de peróxido puede ser uno o más seleccionados del grupo que consiste en catalizadores de descomposición de peróxido de hidrógeno, depuradores de radicales, catalizador de descomposición de radicales libres, antioxidante autorregenerante, antioxidante primario donante de hidrógeno (donante de H), antioxidante secundario depurador de radicales libres y absorbentes de oxígeno (depuradores de oxígeno). Los ejemplos de estos aditivos diferentes pueden encontrarse en WO2009/040571 y WO2009/109780. En algunas realizaciones, el aditivo es un catalizador de descomposición del peróxido de hidrógeno tal como dióxido de cerio (ceria).

- 50 En algunas realizaciones, el aditivo de eliminación de peróxido de hidrógeno o aditivo depurador de radicales peróxido se dispersa en la totalidad de uno más del primer, segundo y tercer componentes de membrana, por ejemplo, en forma de dispersión coloidal. El aditivo de eliminación de peróxido puede estar uniformemente distribuido en la totalidad del componente de membrana.

- 55 En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden otros aditivos opcionales conocidos por el experto en la técnica. Por ejemplo, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana pueden comprender una capa de grafeno, tal como se describe en WO2014/009721. El grafeno actúa como barrera física contra el paso de hidrógeno y su presencia, por lo tanto, reduce aún más el paso de hidrógeno a través de la CCM.

- 60 Dichos componentes de membrana están disponibles comercialmente o pueden prepararse por métodos conocidos de los expertos en la técnica. Por ejemplo, los componentes de membrana se pueden preparar por colada secuencial de una o más capas desde una dispersión de ionómero en una mezcla con disolvente que puede ser, típicamente, una mezcla de agua y alcoholes para formar un componente de membrana. Cada capa se seca antes de cualquier deposición posterior para formar capas adicionales. Si el componente de membrana va a reforzarse, se aplica un componente de refuerzo a una o más de las capas húmedas antes del secado y/o se aplica la dispersión polimérica a un componente de refuerzo, impregnando de esta manera los poros del componente de refuerzo; otros métodos para proporcionar un componente de membrana reforzado son conocidos por el experto en la técnica. El moldeo de la dispersión de ionómero se realiza por cualquier técnica adecuada conocida de los expertos en la

técnica entre las que se incluyen revestimiento por rotograbado, revestimiento con matriz de ranura (ranura, extrusión) (donde el revestimiento se aprieta bajo presión por una ranura sobre el componente portador temporal), serigrafía, serigrafía rotativa, impresión por chorro de tinta, rociado, pintado, revestimiento con barra, revestimiento con almohadilla, técnicas de revestimiento de huecos tales como rodillo de cuchillos o escalpelos (donde el revestimiento se aplica al componente portador temporal que a continuación pasa a través de una ranura entre el cuchillo y un rodillo de soporte), y aplicación con barra de medición, tal como con una barra Meyer, para proporcionar una capa húmeda.

En algunas realizaciones, la primera cara del primer componente de membrana está revestida con la capa de catalizador catódico y la segunda cara del primer componente de membrana no está revestida. En algunas realizaciones, la primera cara del segundo componente de membrana está revestida con la capa de catalizador anódico y la segunda cara del segundo componente de membrana no está revestida. En algunas realizaciones, la primera cara del tercer componente de membrana está revestida con la capa de catalizador de recombinación y la segunda cara del tercer componente de membrana no está revestida. La expresión "componente de membrana revestido con catalizador" se usa para referirse colectivamente al componente de membrana y a la capa de catalizador aplicada sobre ese componente de membrana.

En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador tienen un espesor $\leq 50 \mu\text{m}$, por ejemplo, $\leq 45 \mu\text{m}$, $\leq 40 \mu\text{m}$, $\leq 35 \mu\text{m}$, $\leq 30 \mu\text{m}$, $\leq 25 \mu\text{m}$ o $\leq 20 \mu\text{m}$ (siempre que el espesor total combinado sea $\leq 120 \mu\text{m}$). En algunas realizaciones, cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador tiene un espesor de $\leq 40 \mu\text{m}$, por ejemplo, $\leq 35 \mu\text{m}$, $\leq 30 \mu\text{m}$, $\leq 25 \mu\text{m}$ o $\leq 20 \mu\text{m}$.

En algunas realizaciones, uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador tiene un espesor de $\geq 7 \mu\text{m}$, por ejemplo, $\geq 10 \mu\text{m}$, $\geq 12 \mu\text{m}$, $\geq 14 \mu\text{m}$ o $\geq 16 \mu\text{m}$. En algunas realizaciones, cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador tiene un espesor de $\geq 10 \mu\text{m}$, por ejemplo, $\geq 11 \mu\text{m}$, $\geq 12 \mu\text{m}$, $\geq 13 \mu\text{m}$, $\geq 14 \mu\text{m}$, $\geq 15 \mu\text{m}$ o $\geq 16 \mu\text{m}$.

En algunas realizaciones, el espesor de uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador es de 7 a 40, de 10 a 35 μm , de 12 a 30 μm , de 14 a 25 μm o de 16 a 20 μm . En algunas realizaciones, el espesor de cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestida con catalizador es de 10 a 40 μm , por ejemplo, de 11 a 35 μm , de 12 a 30 μm , de 13 a 25 μm , de 14 a 20 μm , de 15 a 20 μm o de 16 a 20 μm .

En algunas realizaciones, el espesor de cada uno del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador es aproximadamente 20 μm .

En algunas realizaciones, los espesores del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador son aproximadamente iguales. En algunas realizaciones, el primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador tienen el mismo espesor.

En algunas realizaciones, los espesores del primer, segundo y tercer componentes de membrana revestidos con catalizador son diferentes al de uno o más de los otros componentes de membrana revestidos con catalizador. Por ejemplo, el componente de membrana revestido con catalizador del lado del ánodo puede ser más delgado que los dos componentes de membrana revestidos con catalizador restantes.

Capa de catalizador catódico

La capa de catalizador catódico comprende uno o más materiales catalizadores catódicos que son adecuados para catalizar la reacción de desprendimiento de hidrógeno.

El material catalizador catódico comprende uno o más electrocatalizadores. El uno o más electrocatalizadores son independientemente un polvo metálico no soportado finamente dividido o un catalizador soportado en donde las pequeñas nanopartículas metálicas se han dispersado sobre un soporte electroconductor de elevada superficie específica, tal como soportes de negro de carbón. El metal se selecciona adecuadamente de:

- (i) metales del grupo del platino (platino, paladio, rodio, rutenio, iridio y osmio),
- (ii) oro o plata,
- (iii) un metal de base,

o una aleación o mezcla que comprende uno o más de estos metales o sus óxidos.

En algunas realizaciones, el metal es platino, que puede estar aleado con otros metales preciosos o metales de base. Si el electrocatalizador es un catalizador soportado, la carga de nanopartículas metálicas sobre el material

de soporte de carbono está adecuadamente en el intervalo de 10-90 % en peso, preferentemente de 15-75 % en peso del peso del electrocatalizador resultante.

En algunas realizaciones, el catalizador catódico comprende negro de platino no soportado o platino soportado sobre carbono.

La capa de catalizador catódico puede comprender componentes adicionales. Tales componentes incluyen, aunque no de forma limitativa: un polímero conductor de iones, tal como un polímero conductor de protones, incluido para mejorar la conductividad iónica dentro de la capa; un catalizador de descomposición de peróxido de hidrógeno; un aditivo aglutinante polimérico, tal como politetrafluoroetileno (PTFE); un sólido inorgánico con o sin tratamiento superficial para controlar las características de transporte de reactivos y productos. La elección de componentes adicionales está dentro de la capacidad del experto para determinar cuáles componentes adicionales son apropiados.

Para preparar la capa de catalizador catódico, el material catalizador catódico y cualesquiera componentes adicionales se dispersan en un disolvente acuoso y/u orgánico para preparar una tinta de catalizador. Si es necesario, el fraccionamiento de las partículas aglomeradas se realiza por métodos conocidos en la técnica, tales como mezclado de alto cizallamiento, molienda, molienda en molino de bolas, paso a través de un microfluidificador etc., o una combinación de los mismos, para obtener uniformidad del tamaño de partícula.

Después de preparar la tinta de catalizador, la tinta se deposita directamente sobre el primer componente de membrana para formar la capa de catalizador catódico. Alternativamente, la tinta se deposita sobre un sustrato de transferencia/portador para formar una capa de catalizador catódico que después se transfiere al primer componente de membrana mediante el uso de un método de transferencia de calcomanía (dichos métodos son conocidos del experto en la técnica). La tinta puede depositarse sobre el primer componente de membrana o sustrato de transferencia/portador por cualquier técnica adecuada conocida de los expertos en la técnica que incluye, aunque no de forma limitativa, revestimiento por rotograbado, revestimiento con matriz de ranura (ranura, extrusión), serigrafía, serigrafía rotativa, impresión por chorro de tinta, impresión por pulverización, pintura, revestimiento con barra, revestimiento con almohadilla, técnicas de revestimiento de huecos, tales como rodillo de cuchillos o escalpelos y aplicación con varilla medidora.

En algunas realizaciones, la capa de catalizador catódico se aplica al primer componente de membrana a una carga de al menos 0,10 mg de metal precioso por cm^2 (p. ej., mg de Pt cm^{-2}), por ejemplo, al menos 0,15 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo, al menos 0,20 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,25 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,30 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,35 mg de metal precioso por cm^2 o al menos 0,40 mg de metal precioso por cm^2 .

En algunas realizaciones, la capa de catalizador catódico se aplica al primer componente de membrana a una carga de hasta 4,0 mg de metal precioso por cm^2 (p. ej., mg de Pt cm^{-2}), por ejemplo hasta 2,0 mg de metal precioso por cm^2 , hasta 1,0 mg de metal precioso por cm^2 , hasta 0,75 mg de metal precioso por cm^2 o hasta 0,4 mg de metal precioso por cm^2 .

En algunas realizaciones, la carga del catalizador catódico en el primer componente de membrana está en el intervalo de 0,10 a 4,0 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo, de 0,2 a 2,0 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo, de 0,25 a 1,0 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo, de 0,30 a 0,90 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo, de 0,35 a 0,90 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo, de 0,40 a 0,8 mg de metal precioso por cm^2 .

Capa de catalizador anódico

La capa de catalizador anódico comprende uno o más materiales catalizadores anódicos que son adecuados para catalizar la reacción de desprendimiento de oxígeno.

En algunas realizaciones, el material catalizador anódico comprende óxido de iridio no soportado (también conocido como "negro"), aleaciones u óxidos metálicos mixtos (cristal mixto) o mezclas de óxidos de iridio y/o negro de rutenio, aleaciones de óxidos metálicos mixtos (cristal mixto) o mezclas de óxidos de iridio y/o negro de rutenio con un metal u óxido adicional (por ejemplo, tántalo, niobio, titanio), iridio en un soporte o aleaciones de iridio y/o rutenio u óxidos metálicos mixtos (cristal mixto) o mezclas de óxidos de iridio y/o rutenio con un metal u óxido adicional en un soporte. En algunas realizaciones, el soporte se selecciona de óxido de estaño dopado con antimonio y titania dopada con niobio.

La capa de catalizador anódico puede comprender componentes adicionales. Tales componentes incluyen, aunque no de forma limitativa; un polímero conductor de iones, tal como un polímero conductor de protones, incluido para mejorar la conductividad iónica dentro de la capa; un catalizador de descomposición de peróxido de hidrógeno; un aditivo aglutinante polimérico, tal como politetrafluoroetileno (PTFE); un sólido inorgánico con o sin tratamiento superficial para controlar las características de transporte de reactivos y productos. La elección de componentes adicionales está dentro de la capacidad del experto para determinar cuáles componentes adicionales son apropiados.

Para preparar la capa de catalizador anódico, el material catalizador anódico y cualesquiera componentes adicionales se dispersan en un disolvente acuoso y/u orgánico para preparar una tinta de catalizador.

- 5 Si es necesario, el fraccionamiento de las partículas aglomeradas se realiza por métodos conocidos en la técnica, tales como mezclado de alto cizallamiento, molienda, molienda en molino de bolas, paso a través de un microfluidificador etc., o una combinación de los mismos, para obtener uniformidad del tamaño de partícula.

- 10 Después de preparar la tinta de catalizador, la tinta se deposita directamente sobre el segundo componente de membrana para formar la capa de catalizador anódico. Alternativamente, la tinta se deposita sobre un sustrato de transferencia/portador para formar una capa de catalizador anódico que después se transfiere al segundo componente de membrana mediante el uso de un método de transferencia de calcomanía (dichos métodos son conocidos del experto en la técnica). La tinta puede depositarse sobre el segundo componente de membrana o sustrato de transferencia/portador por cualquier técnica adecuada conocida de los expertos en la técnica que incluye, aunque no de forma limitativa, revestimiento por rotograbado, revestimiento con matriz de ranura (ranura, extrusión), serigrafía, serigrafía rotativa, impresión por chorro de tinta, pulverización, pintura, con barra, revestimiento con almohadilla, técnicas de revestimiento de huecos, tales como rodillo de cuchillos o escalpelos y aplicación con varilla medidora.

- 20 En algunas realizaciones, la capa de catalizador anódico se aplica al segundo componente de membrana a una carga de al menos 0,4 mg de metal precioso por cm^2 (p. ej., mg de Ir cm^{-2}), por ejemplo, al menos 0,5 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,6 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,7 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,8 mg de metal precioso por cm^2 o al menos 0,9 mg de metal precioso por cm^2 .

- 25 En algunas realizaciones, la capa de catalizador del ánodo se aplica al segundo componente de membrana a una carga de hasta 4,0 mg de metal precioso por cm^2 (p. ej., mg de Ir cm^{-2}), por ejemplo, hasta 3,0 mg de metal precioso por cm^2 , hasta 2,0 mg de metal precioso por cm^2 , hasta 1,75 mg de metal precioso por cm^2 o hasta 1,5 mg de metal precioso por cm^2 .

- 30 En algunas realizaciones, la capa de catalizador anódico que se carga sobre el segundo componente de membrana está en el intervalo de 0,40 a 4,0 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,50 a 2,00 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,60 a 1,90 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,65 a 1,85 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,70 a 1,80 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,80 a 1,60 mg de metal precioso por cm^2 .

- 35 En algunas realizaciones, la capa de catalizador anódico que se carga sobre el segundo componente de membrana está en el intervalo de 0,6 a 1,2 mg de metal precioso por cm^2 .

Capa de catalizador de recombinación

- 40 La capa de catalizador de recombinación comprende uno o más materiales catalizadores de recombinación.

El material catalizador de recombinación no está especialmente limitado y se puede seleccionar de cualquier catalizador adecuado que cataliza la recombinación de H_2 y O_2 para formar agua.

- 45 Por ejemplo, el material catalizador de recombinación comprende un metal (tal como platino o paladio) en un material de soporte de superficie específica elevada (tal como carbono, sílice, titania, circonia). Más ejemplos de materiales catalizadores de recombinación se describen en EP-0631337 y WO00/24074.

- 50 Por ejemplo, el material catalizador de recombinación comprende partículas metálicas no soportadas, (tales como platino o paladio o aleaciones u óxidos mixtos de platino y paladio con otros metales tales como cerio y titanio)

En algunas realizaciones, el catalizador de recombinación comprende paladio soportado en carbono, platino soportado en carbono, rodio soportado en carbono o un platinum group metal (metal del grupo platino - PGM) (platino, paladio, iridio, rodio, rutenio, osmio) soportado en sílice.

- 55 La capa de catalizador de recombinación puede comprender componentes adicionales. Tales componentes incluyen, aunque no de forma limitativa: un polímero conductor de iones, tal como un polímero conductor de protones, incluido para mejorar la conductividad iónica dentro de la capa; un catalizador de descomposición de peróxido de hidrógeno; un aditivo aglutinante polimérico, tal como politetrafluoroetileno (PTFE); un sólido inorgánico con o sin tratamiento superficial para controlar las características de transporte de reactivos y productos. La elección de componentes adicionales está dentro de la capacidad del experto para determinar cuáles componentes adicionales son apropiados.

- 65 Para preparar la capa de catalizador de recombinación, el material catalizador de recombinación y cualesquiera componentes adicionales se dispersan en un disolvente acuoso y/u orgánico para preparar una tinta de catalizador.

Si es necesario, el fraccionamiento de las partículas aglomeradas se realiza por métodos conocidos en la técnica, tales como mezclado de alto cizallamiento, molienda, molienda en molino de bolas, paso a través de un microfluidificador etc., o una combinación de los mismos, para obtener uniformidad del tamaño de partícula.

Después de preparar la tinta de catalizador, la tinta se deposita directamente sobre el tercer componente de membrana para formar la capa de catalizador de recombinación. Alternativamente, la tinta se deposita sobre un sustrato de transferencia/portador para formar una capa de catalizador que después se transfiere al tercer componente de membrana mediante el uso de un método de transferencia de calcomanía (dichos métodos son conocidos del experto en la técnica). La tinta puede depositarse sobre el tercer componente de membrana o sustrato de transferencia/portador por cualquier técnica adecuada conocida de los expertos en la técnica que incluye, aunque no de forma limitativa, revestimiento por rotograbado, revestimiento con matriz de ranura (ranura, extrusión), serigrafía, serigrafía rotativa, impresión por chorro de tinta, impresión por pulverización, pintura, revestimiento con barra, revestimiento con almohadilla, técnicas de revestimiento de huecos, tales como rodillo de cuchillos o escalpelos y aplicación con varilla medidora.

En algunas realizaciones, el catalizador de recombinación se aplica al tercer componente de membrana a una carga de al menos 0,010 mg de metal precioso por cm^2 (p. ej., mg de Pd cm^{-2}), por ejemplo, al menos 0,015 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,020 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,025 mg de metal precioso por cm^2 , al menos 0,030 mg de metal precioso por cm^2 o al menos 0,035 mg de metal precioso por cm^2 .

En algunas realizaciones, el catalizador de recombinación se aplica al tercer componente de membrana a una carga de hasta 0,100 mg de metal precioso por cm^2 (p. ej., mg de Pd cm^{-2}), por ejemplo, hasta 0,095 mg de metal precioso por cm^2 , hasta 0,090 mg de metal precioso por cm^2 , hasta 0,085 mg de metal precioso por cm^2 , hasta 0,080 mg de metal precioso por cm^2 o hasta 0,075 mg de metal precioso por cm^2 .

En algunas realizaciones, la carga del catalizador de recombinación sobre el tercer componente de membrana está en el intervalo de 0,02 a 0,10 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,025 a 0,09 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,030 a 0,085 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,035 a 0,080 mg de metal precioso por cm^2 , por ejemplo de 0,04 a 0,08 mg de metal precioso por cm^2 .

Uso de la CCM

En algunas realizaciones, el uso de la CCM se realiza dentro de un electrolizador de agua.

En algunas realizaciones, el uso del catalizador de recombinación dentro de la CCM permite usar una CCM generalmente más delgada, y seguir minimizando el paso de hidrógeno dentro de un electrolizador de agua.

En algunas realizaciones, el uso del catalizador de recombinación dentro de la CCM es para minimizar simultáneamente el paso de hidrógeno a la vez que se reduce la resistencia iónica dentro del electrolizador de agua.

En algunas realizaciones, el uso del catalizador de recombinación dentro de la CCM es para mejorar el riesgo de seguridad asociado con el funcionamiento del electrolizador de agua.

Proporcionar la primera, segunda y tercera membranas

En algunas realizaciones, cada una de las etapas de “proporcionar un primer componente de membrana que tiene una capa de catalizador catódico dispuesta sobre una primera cara del mismo”, “proporcionar un segundo componente de membrana que tiene una capa de catalizador anódico dispuesta sobre una primera cara del mismo”, y “proporcionar un tercer componente de membrana que tiene una capa de catalizador de recombinación dispuesta en un primer lado del mismo” se consigue mediante la aplicación directa de las capas de catalizador sobre los componentes de membrana. En algunas realizaciones, las capas de catalizador se aplican directamente sobre los componentes de la membrana mientras cada componente de la membrana se une a una película portadora de soporte, retirándose las películas portadoras respectivas de los componentes de la membrana después del revestimiento y antes de la estratificación.

Así, el componente de membrana queda soportado sobre sus respectivas películas portadoras durante la adición de la capa de catalizador, lo que evita o reduce la distorsión del componente de membrana producida por la adición de la capa de catalizador.

Además, los componentes de membrana están protegidos por sus láminas de soporte durante la adición de cada una de las tres capas de catalizador y, a continuación, se pueden estratificar inmediatamente después de retirar las láminas de soporte, lo que contrasta con los métodos conocidos en los que una o más de las capas de catalizador se añaden después de retirar las láminas de soporte, lo que tiene el riesgo de dañar el componente de membrana y dificultar el control de la calidad del segundo revestimiento.

Las láminas de soporte ayudan a mantener el componente de membrana en posición para añadir la capa de catalizador. En algunas realizaciones, cada componente de membrana se mantiene en posición mediante su lámina

de soporte durante la adición de la capa de catalizador. En algunas realizaciones, el componente de membrana se sujeta mediante un lecho al vacío calentado.

Los métodos para aplicar cada capa de catalizador sobre su respectivo componente de membrana se han descrito anteriormente.

En algunas realizaciones, después de haber depositado las capas de catalizador sobre cada componente de membrana, las láminas de soporte se retiran de cada componente de membrana y se realiza la etapa de estratificación.

En algunas realizaciones, después de retirar las láminas de soporte, se realiza la estratificación sin ninguna etapa de procesamiento intermedio, tal como el revestimiento de los componentes de la membrana. Así se mejora la estabilidad dimensional de los componentes de membrana, ya que el revestimiento por ambos lados de un componente de membrana puede producir deformaciones y reducir la calidad del producto estratificado final.

En algunas realizaciones, el revestimiento del primer, segundo y tercer componentes de membrana con sus catalizadores respectivos se lleva a cabo simultáneamente y seguido de una sola etapa de estratificación en caliente para consolidar los componentes de membrana. Así se proporciona un proceso de producción altamente eficiente en energía y rentable. En contraposición, los métodos de producción conocidos incluyen múltiples etapas de revestimiento consecutivas (por ejemplo, una primera etapa de revestimiento para aplicar un catalizador de recombinación a una cara de un componente de membrana seguido de una segunda etapa de revestimiento para aplicar un catalizador anódico o catódico a la otra cara del mismo componente de membrana) y etapas de transferencia, lo que reduce la productividad del proceso y limita la eficacia.

En algunas realizaciones, una vez que un componente de membrana se ha revestido con un catalizador, se somete a una etapa de secado para secar el catalizador, por ejemplo, secado por infrarrojos (IR).

Estratificación de la primera, segunda y tercera membranas

En algunas realizaciones, el primer, segundo y tercer componentes de membrana se estratifican juntos en una sola etapa de estratificación.

Así se realiza un proceso de producción muy eficaz, ya que solo se requiere una etapa de estratificación en caliente. El proceso es eficaz tanto en tiempo como en uso de energía.

En algunas realizaciones, los componentes de membrana se disponen de tal manera que las segundas caras del primer y segundo componentes de membrana quedan orientadas hacia el tercer componente de membrana.

Así, según se describe anteriormente, se proporciona una CCM que puede incorporarse a un electrolizador.

En algunas realizaciones, los componentes de membrana se disponen de tal manera que la primera cara del tercer componente de membrana queda orientada hacia el segundo componente de membrana.

Así, la capa de catalizador de recombinación se coloca más cerca de la capa de catalizador anódico durante la estratificación, de manera que la capa de catalizador de recombinación se coloca más cerca de la capa de catalizador anódico en la CCM estratificada, lo que proporciona las ventajas descritas anteriormente.

En algunas realizaciones, la estratificación se lleva a cabo al estratificar los componentes de membrana revestidos de catalizador en la disposición requerida, seguida por someter la disposición de capas a calor y/o presión para consolidarlas en la estructura estratificada.

En algunas realizaciones, la estratificación se lleva a cabo mediante prensado térmico. En algunas realizaciones, la estratificación se lleva a cabo a una temperatura de al menos 120 °C, por ejemplo, al menos 130 °C, al menos 140 °C o al menos 150 °C. En algunas realizaciones, la estratificación se lleva a cabo a una temperatura de hasta 220 °C, por ejemplo, hasta 200 °C, hasta 190 °C, hasta 180 °C o hasta 170 °C.

En algunas realizaciones, la estratificación se lleva a cabo a una presión de al menos 5000 kPa, por ejemplo, al menos 5100 kPa, al menos 5200 kPa o al menos 5300 kPa. En algunas realizaciones, la estratificación se realiza a una presión de hasta 6000 kPa, por ejemplo, hasta 5900 kPa, hasta 5800 kPa o hasta 5700 kPa.

En algunas realizaciones, las capas se someten a calor y/o presión durante al menos 30 s, por ejemplo, al menos 40 s, al menos 50 s, al menos 60 s o al menos 70 s. En algunas realizaciones, las capas se someten a calor y/o presión durante hasta 5 min, por ejemplo, hasta 4,5 min, hasta 4 min, hasta 3,5 min, hasta 3 min o hasta 2,5 min.

Así se puede proporcionar un CCM con capas que están correctamente adheridas entre sí sin dañarse o experimentar efectos perjudiciales en la CCM o en las propiedades del componente de membrana.

En algunas realizaciones, el proceso de estratificación además comprende una etapa de revestimiento de una capa que comprende un aditivo de eliminación de peróxido sobre uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana. Preferiblemente, el revestimiento de aditivo de eliminación de peróxido se realiza antes del revestimiento de las capas de catalizador.

En algunas realizaciones, la CCM se prepara en un proceso continuo con rodillos consecutivos, en donde el primer, segundo y tercer rodillos que comprenden, respectivamente, el primer, segundo y tercer componentes de membrana, cada uno revestido con su respectiva capa de catalizador, se desenrollan en una primera etapa, se retiran de sus láminas de soporte en una segunda etapa y se estratifican juntos para formar la CCM que tiene una estructura estratificada en una tercera etapa. Posteriormente, en algunas realizaciones, la CCM que tiene una estructura estratificada se conforma propiamente en un cuarto rodillo en una cuarta etapa, de ahí la expresión “rodillos consecutivos” para ese proceso de fabricación.

Alternativamente, se proporcionan el primer, segundo y tercer rodillos del componente de membrana y las capas de catalizador se aplican sobre los componentes de membrana después de desenrollar el primer, segundo y tercer rodillos y antes de la estratificación.

En algunas realizaciones, el proceso además comprende una etapa de revestimiento de una capa que comprende un aditivo de eliminación de peróxido sobre uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana. Esto puede suceder antes de enrollarse en el primer, segundo y tercer rodillos o después de desenrollar el primer, segundo y tercer rodillos, pero antes de la estratificación. Preferiblemente, el revestimiento de aditivo de eliminación de peróxido se realiza antes del revestimiento de las capas de catalizador.

En algunas realizaciones, la etapa de estratificación se realiza con calor y/o presión.

Un proceso de ese tipo es muy eficaz ya que cada una de las tres membranas se desenrolla por separado y se reviste en etapas que pueden producirse simultáneamente, seguido por la estratificación en una sola etapa, lo que ahorra tiempo y energía.

Electrolizador de agua (PEMWE)

En algunas realizaciones, la CCM de la invención se ensambla entre colectores de corriente anódica y catódica y se comprime entre placas bipolares dentro de una pila de PEMWE. El colector de corriente anódica puede seleccionarse de cualquier placa metálica porosa adecuada tal como sinterizados de titanio o acero inoxidable, con o sin revestimientos (tales como metales preciosos u óxidos conductores o nitruros) según sea adecuado para las condiciones operativas de interés. El colector de corriente catódica puede ser una placa metálica porosa similar al colector de corriente anódica o bien una carbon based gas diffusion layer (capa de difusión con base de carbono - GDL) como sabe el experto en la técnica. A continuación, estos colectores de corriente se colocan entre placas de distribución de agua que pueden ser campos de flujo mecanizados o estampado o láminas o mallas metálicas porosas. Después, una o más de estas unidades se colocan entre placas finales que proporcionan las conexiones de fluido y compresión a todo el sistema y esta pila se combina a continuación con el resto de la planta para formar el sistema PEMWE.

Figuras

La Figura 1 muestra una vista esquemática en despiece de una CCM según una realización de la invención.

La Figura 2 muestra una vista en sección esquemática de una CCM según una realización de la invención después de la estratificación.

La Figura 3 muestra una vista en sección esquemática de un componente de membrana revestido con una capa de catalizador mientras está en posición sobre una lámina de soporte.

La Figura 4 muestra un esquema de un proceso de estratificación discreto para producir una CCM según una realización de la invención.

La Figura 5 muestra un proceso esquemático de estratificación continua (parte de un proceso de “rodillos consecutivos”) para producir una CCM según una realización de la invención.

La Figura 6 es un gráfico que muestra el rendimiento de un electrolizador que incluye CCM según el estado de la técnica y CCM según la invención.

La Figura 7 es una representación gráfica del paso de hidrógeno frente a la densidad de corriente para tres electrolizadores diferentes, dos que incluyen CCM del estado de la técnica y uno que incluye una CCM según una realización de la invención.

Descripción detallada

- La Figura 1 muestra una vista en despiece de una CCM según una realización de la invención. La CCM 1 consiste en tres componentes de membrana revestida con catalizador individuales. Un primer componente 10 de membrana tiene una primera cara 10a y una segunda cara 10b. Un segundo componente 11 de membrana tiene una primera cara 11a y una segunda cara 11b. Un tercer componente 12 de membrana tiene una primera cara 12a y una segunda cara 12b.
- Una capa 13 de catalizador catódico se coloca adyacente a la primera cara 10a del primer componente 10 de membrana. En la práctica, esta capa se aplica a la primera cara 10a del primer componente 10 de membrana. La primera cara 10a del primer componente 10 de membrana está orientada hacia afuera, de manera que la capa 13 de catalizador catódico se coloca sobre una superficie externa de la CCM.
- Una capa 14 de catalizador anódico se coloca adyacente a la primera cara 11a del segundo componente 11 de membrana. En la práctica, esta capa se aplica a la primera cara 11a del segundo componente 11 de membrana. La primera cara 11a del segundo componente 11 de membrana está orientada hacia afuera, de manera que la capa 14 de catalizador anódico se coloca sobre una superficie externa de la CCM —la superficie opuesta a la capa de catalizador catódico.
- Una capa 15 de catalizador de recombinación se coloca adyacente a la primera cara 12a del tercer componente 12 de membrana. En la práctica, esta capa se aplica a la primera cara 12a del tercer componente 12 de membrana. La capa 15 de catalizador de recombinación también se coloca adyacente a la segunda cara 11b del segundo componente 11 de membrana. Por lo tanto, la capa de catalizador de recombinación queda intercalada entre el segundo y tercer componentes 11 y 12 de membrana, y se encuentra en una posición más cercana a la capa de catalizador anódico que a la capa de catalizador catódico.
- La Figura 2 muestra la misma CCM que la Figura 1, ensamblada y en sección transversal.
- Cada uno del primer, segundo y tercer componentes 10, 11 y 12 de membrana están revestidos con su respectiva capa de catalizador mientras están fijados a una lámina de soporte. La Figura 3 muestra un proceso mediante el cual el primer componente 10 de membrana se puede revestir con una capa 13 de catalizador catódico mientras está colocada sobre su lámina 13c de soporte. El componente de membrana se mantiene en su lugar mediante el uso de un lecho al vacío calentado (no se muestra) y la capa de catalizador se deposita mediante el uso de un revestidor por pulverización ultrasónica. En la Figura 3, el revestidor por pulverización ultrasónica se ha representado mediante la boquilla 20. Se puede usar el mismo proceso que se muestra en la Figura 3 para revestir los componentes 11 y 12 de membrana con sus respectivas capas de catalizador.
- La Figura 4 demuestra el proceso mediante el cual puede prepararse la CCM de la invención, que muestra los componentes 10, 11 y 12 de membrana individuales en posición listos para estratificación tras revestirse con las capas 13, 14 y 15 de catalizador, respectivamente. Como se muestra en la Figura 4, el primer componente 10 de membrana está revestido con catalizador catódico 13, el segundo componente 11 de membrana está revestido con catalizador anódico 14 y el tercer componente 12 de membrana está revestido con catalizador 15 de recombinación.
- La Figura 4 muestra un proceso para estratificar los tres componentes 10, 11 y 12 de membrana revestidos para formar una CCM 1 discreta. Una vez que cada componente 10, 11 y 12 de membrana se ha revestido con su capa de catalizador, las láminas de soporte (no se muestran) se retiran de cada componente de membrana y los componentes de membrana revestidos con catalizador se disponen uno sobre otro en el orden correcto antes de colocarlos entre dos láminas 21, 22 de PTFE y dos placas 23, 24 de titanio y se presionan a temperatura en un paquete de prensado. En la realización mostrada en la Figura 4, la capa 12 intermedia central está orientada de manera que la capa 15 de catalizador de recombinación está orientada hacia el segundo componente 11 de membrana. Esto se debe al índice de difusión más rápido del H_2 comparado con el O_2 a través de la CCM. La orientación de los componentes de membrana de la manera mostrada significa que, dado que los componentes de membrana tienen igual espesor, la capa de catalizador de recombinación estará colocada más cerca de la capa de catalizador anódico en la CCM estratificada final. Como resultado, la capa de catalizador de recombinación estará más cerca del plano en el que los niveles de H_2 y O_2 son adecuados para una recombinación más eficaz.
- Cuando los componentes de membrana revestidos con catalizador se han dispuesto adecuadamente, se estratifican mediante prensado térmico entre las láminas 21, 22 de PTFE y las placas 23, 24 de titanio, a p. ej. 170 °C y 800 psi (aprox. 5500 kPa) durante 2 minutos para consolidar los componentes de membrana revestidos con catalizador en la CCM 1 mostrada en sección transversal en la Figura 2.
- Después de preparar la CCM, se colocan colectores de corriente adecuados en ambas caras de la CCM para permitir su incorporación a un electrolizador de agua (PEMWE).

La Figura 5 muestra un proceso continuo alternativo para la producción de una CCM3 según la invención. El producto del proceso es una larga lámina de CCM3 que puede almacenarse en forma de rollo (no se muestra). El primer, segundo y tercer componentes 30, 31 y 32 de membrana son también largas láminas que se pueden almacenar en forma de rollos (no se muestran) antes de procesarse en la CCM. El proceso que se muestra en la Figura 5 es, por lo tanto, la parte intermedia de un proceso de rodillos consecutivos.

Los componentes 30, 31 y 32 de membrana, revestidos con capas de catalizador en cada una de su primera cara 30a, 31a y 32a, respectivamente, y las láminas 30c, 31c y 32c de soporte, respectivamente, en los otros lados se muestran en la Figura 5. Las láminas 30c, 31c y 32c de soporte se retiran de los componentes 30, 31 y 32 de membrana desprendiendo las láminas 30c, 31c y 32c de soporte de los componentes 30, 31 y 32 de membrana y pasándolas sobre los rodillos 36a, 36b y 36c. Después, los tres componentes 30, 31 y 32 de membrana revestidos con capas 30a, 31a y 32a de catalizador, respectivamente, se reúnen a medida que se acercan a los rodillos 37a y 37b hasta que entran en contacto. La segunda cara 30b del primer componente 30 de membrana entra en contacto con la segunda cara 32b del tercer componente 32 de membrana.

Mientras tanto, la segunda cara 31b del segundo componente 31 de membrana entra en contacto con la primera cara 32a del tercer componente 32 de membrana (que está revestido con el catalizador 35 de recombinación).

Una vez que los componentes de membrana se han puesto en contacto, la estructura estratificada se somete a calor y presión para consolidar los componentes en una lámina CCM3, con una capa 33 de catalizador catódico sobre una superficie y una capa 34 de catalizador anódico sobre la otra superficie, y una capa 35 de catalizador de recombinación interna en su interior. A continuación, la lámina 3 se puede conformar en una bobina (no se muestra) para almacenamiento y transporte y/o cortarse en CCM individuales del tamaño adecuado según sea necesario.

Ejemplos

Ejemplo 1—Preparación de la CCM

La CCM 1 se preparó usando tres componentes de membrana individuales. Cada componente de membrana tenía un espesor nominal de 17 μm , comprendía un ionómero Flemion™ con PEq 900 de Asahi Glass Group con refuerzo de e-PTFE y tenía un catalizador depurador de peróxido de hidrógeno de ceria revestido en un lado. Una capa catódica de catalizador que comprendía negro de Pt en una dispersión de ionómero (Nafion acuoso 1100PEq, 12 % en peso con respecto al Pt) se aplicó en una cantidad de 1 mg de Pt/cm² sobre uno de los componentes de membrana, encima del catalizador depurador. Una capa de catalizador anódico que comprendía IrO₂ negro en una solución de ionómero (Nafion acuoso 1100PEq de Chemours Corp, 12 % en peso con respecto al Ir) se aplicó en una cantidad de 2 mg Ir/cm² sobre otro de los componentes de membrana, encima de la capa depuradora. Un catalizador de recombinación que comprendía Pd soportado sobre negro de carbón en una solución de ionómero (Nafion 1100PEq, 300 % en peso con respecto al carbón) se depositó sobre el componente de membrana final en una cantidad de 0,04 mg Pd/cm², encima del catalizador depurador. Las capas de catalizador se depositaron con un revestidor por pulverización ultrasónica (Sonotek ExactCoat con un cabezal de revestimiento por impacto de 120 kHz).

A continuación, los tres componentes de membrana revestidos con catalizador se dispusieron con el componente de membrana que tenía la capa de catalizador de recombinación en el medio, intercalada entre los otros dos componentes de membrana con las capas de catalizador anódico y catódico orientadas hacia el exterior. El componente de membrana central estaba orientado de manera que la capa de catalizador de recombinación estaba orientada hacia el componente de membrana que llevaba la capa de catalizador anódico (como en la Figura 2).

A continuación, estas tres capas se estratificaron para formar la CCM 1.

Ejemplo comparativo 1—preparación de CCM

El CCM A se preparó usando una membrana Nafion 117 (RTM) (membrana de intercambio iónico perfluorada de 177,8 μm de espesor; peso equivalente (PEq) = 1100). Un catalizador catódico que comprendía negro de Pt en una solución de ionómero (Nafion acuoso 1100PEq, 12 % en peso con respecto al Pt) se aplicó en una cantidad de 1 mg Pt/cm² en un lado de la membrana Nafion 117 y un catalizador anódico que comprendía IrO₂ negro en una solución de ionómero (Nafion acuoso 1100PEq, 12 % en peso con respecto al Ir) se revistió en una cantidad de 2 mg Ir/cm² en el otro lado, para proporcionar la CCM A. Los catalizadores se depositaron usando un revestidor por pulverización ultrasónica (Sonotek ExactCoat con un cabezal de revestimiento por impacto de 120 kHz).

Ejemplo comparativo 2—preparación de CCM

Se preparó la CCM B usando tres componentes de membrana individuales idénticos a los usados para CCM 1, con refuerzo de e-PTFE y una capa depuradora de peróxido. Los tres componentes de membrana se estratificaron para formar una membrana estratificada antes de revestirse por una cara con un catalizador catódico (como se usó en la Membrana 1) y por el otro lado con un catalizador anódico (como se usó en la membrana 1) para proporcionar la CCM B.

5

Ejemplo 2—Rendimiento del electrolizador con CCM

Cada CCM se probó a 60 °C con una estación de prueba del electrolizador y una instalación de celda QCF25 de Baltic Fuel Cells con campos de flujo paralelo mecanizados con carbono en el lado catódico y el lado anódico de titanio. Las CCM se ensamblaron entre una capa de difusión de gases basada en carbono en el lado catódico (SGL 10BB) y un sinterizado de titanio poroso revestido de oro (Mott) en el lado anódico. Después, la MEA ensamblada se calentó en el sitio haciendo pasar el agua de reactivo sobre el lado catódico que, a su vez se calentaba mediante un intercambiador de calor de tubos y un baño de agua. Las curvas de polarización se registraron desde 2 A cm^{-2} hasta $0,1 \text{ A cm}^{-2}$ con espera en cada punto de 170 s. Se midió el hidrógeno en el oxígeno después de enfriar el gas de escape anódico con un intercambiador de calor usando un detector de conductividad térmica de cuatro puertos (GE-XMTC) con oxígeno puro como el gas de referencia y calibrado contra un 10 % de H_2 en gas de referencia de N_2 y se corrigió según las diferentes conductividades térmicas de O_2 y N_2 . Los datos de paso se registraron continuamente y se informaron los puntos finales para cada densidad actual.

10

15

20

Como se muestra en la Figura 6, se observa un rendimiento mejorado (menores tensiones aplicadas a una corriente dada) para la CCM B y la CCM 1 debido al espesor reducido de ambas membranas con respecto a la CCM A. El rendimiento mejorado puede atribuirse a la menor resistencia de la CCM debido a la disminución del gradiente de las curvas de polarización en CCM 1 y CCM B en comparación con CCM A.

25

Sin embargo, como se muestra en la Figura 7, el paso de hidrógeno observado para CCM B fue inaceptablemente alto para el inicio de su vida. Típicamente, se usa un límite de hidrógeno en oxígeno al 2 % para garantizar que no haya una mezcla inflamable en el sistema, y un nivel inicial tan alto produciría una vida útil de funcionamiento reducida del sistema debido a una membrana más delgada que aumenta el paso con el tiempo. El nivel más bajo de paso de hidrógeno se observó para CCM 1. Aunque el paso de hidrógeno para CCM A no fue tan alto como para CCM B, fue mayor que para CCM 1.

30

La CCM 1 fue la única membrana probada que demostró tanto un buen rendimiento como niveles aceptablemente bajos de paso de hidrógeno

REIVINDICACIONES

1. Una membrana revestida con catalizador para un electrolizador de agua, que tiene una estructura estratificada que comprende:
una primera capa que comprende un primer componente de membrana, teniendo el primer componente de membrana una capa de catalizador catódico dispuesta sobre una primera cara del mismo;
una segunda capa que comprende un segundo componente de membrana, teniendo el segundo componente de membrana una capa de catalizador anódico dispuesta sobre una primera cara del mismo; y
una capa intermedia dispuesta entre la primera y segunda capas, que comprende un tercer componente de membrana, teniendo el tercer componente de membrana una capa de catalizador de recombinación dispuesta sobre una primera cara del mismo;
en donde las segundas caras del primer y segundo componentes de membrana están orientadas hacia la capa intermedia.
2. Una membrana revestida con catalizador según la reivindicación 1, en donde cada una de la primera y segunda capas son adyacentes a la capa intermedia.
3. Una membrana revestida con catalizador según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde una segunda cara del primer componente de membrana es adyacente a la capa intermedia y una segunda cara del segundo componente de membrana es adyacente a la capa intermedia, y la capa intermedia está orientada de manera que la capa de catalizador de recombinación esté dispuesta adyacente a la segunda capa.
4. Una membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 en donde la membrana revestida con catalizador tiene un espesor total de $\leq 120 \mu\text{m}$.
5. Una membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4 en donde el primer, segundo y tercer componentes de membrana son componentes de membrana electrolítica polimérica sólida que comprenden un ionómero.
6. Una membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde uno o más del primer, segundo y tercer componentes de membrana comprenden además una capa de refuerzo.
7. Una membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde el catalizador catódico comprende negro de platino no soportado o platino soportado sobre carbono.
8. Una membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 en donde el catalizador anódico se selecciona de negro de óxido de iridio no soportado, aleaciones u óxidos metálicos mezclados o mezclas de iridio y/o negro de rutenio, opcionalmente con un metal u óxido adicional, iridio en un soporte y aleaciones u óxidos metálicos mixtos o mezcla de óxidos de iridio y/o rutenio, opcionalmente, con un metal de adición de óxido en un soporte.
9. Una membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 en donde el catalizador de recombinación se selecciona de paladio sobre carbono, platino sobre carbono, rodio sobre carbono y PGM sobre sílice.
10. Una membrana revestida con catalizador según la reivindicación 1, que consiste en las siguientes capas, en orden:
 - (a) una capa de catalizador catódico que comprende un catalizador catódico;
 - (b) un primer componente de membrana;
 - (c) un tercer componente de membrana;
 - (d) una capa de catalizador de recombinación que comprende un catalizador de recombinación;
 - (e) un segundo componente de membrana; y
 - (f) una capa de catalizador anódico que comprende un catalizador anódico.
11. Un método para fabricar una membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, que comprende:
proporcionar un primer componente de membrana, teniendo el primer componente de membrana una capa de catalizador catódico dispuesta sobre una primera cara del primer componente de membrana;

- proporcionar un segundo componente de membrana, teniendo el segundo componente de membrana una capa de catalizador anódico dispuesta sobre una primera cara del segundo componente de membrana;
- 5 proporcionar un tercer componente de membrana, teniendo el tercer componente de membrana una capa de catalizador de recombinación dispuesta sobre una primera cara del tercer componente de membrana; y
- 10 estratificar el primer, segundo y tercer componentes de membrana juntos para formar una membrana revestida con catalizador que tiene una estructura estratificada, de manera que el tercer componente de membrana se dispone entre el primer y segundo componentes de membrana dentro de la estructura estratificada; y
- en donde las segundas caras del primer y segundo componentes de membrana de la estructura estratificada están orientadas hacia la capa intermedia.
- 15 12. Un método según la reivindicación 11 en donde el primer, segundo y tercer componentes de membrana se estratifican juntos en una sola etapa de estratificación.
13. Un método según la reivindicación 11 o la reivindicación 12, en donde antes de la estratificación, los componentes de membrana se disponen de tal manera que la segunda cara del primer componente de membrana está orientada hacia la segunda cara del tercer componente de membrana y la segunda cara de la segunda membrana está orientada hacia la primera cara del tercer componente de membrana.
- 20 14. Un electrolizador de agua que comprende la membrana revestida con catalizador según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10.
- 25 15. Un método para generar gas de hidrógeno que comprende las etapas de electrolizar agua mediante el uso de un electrolizador de agua según la reivindicación 14 y generar gas de hidrógeno.

Figura 1

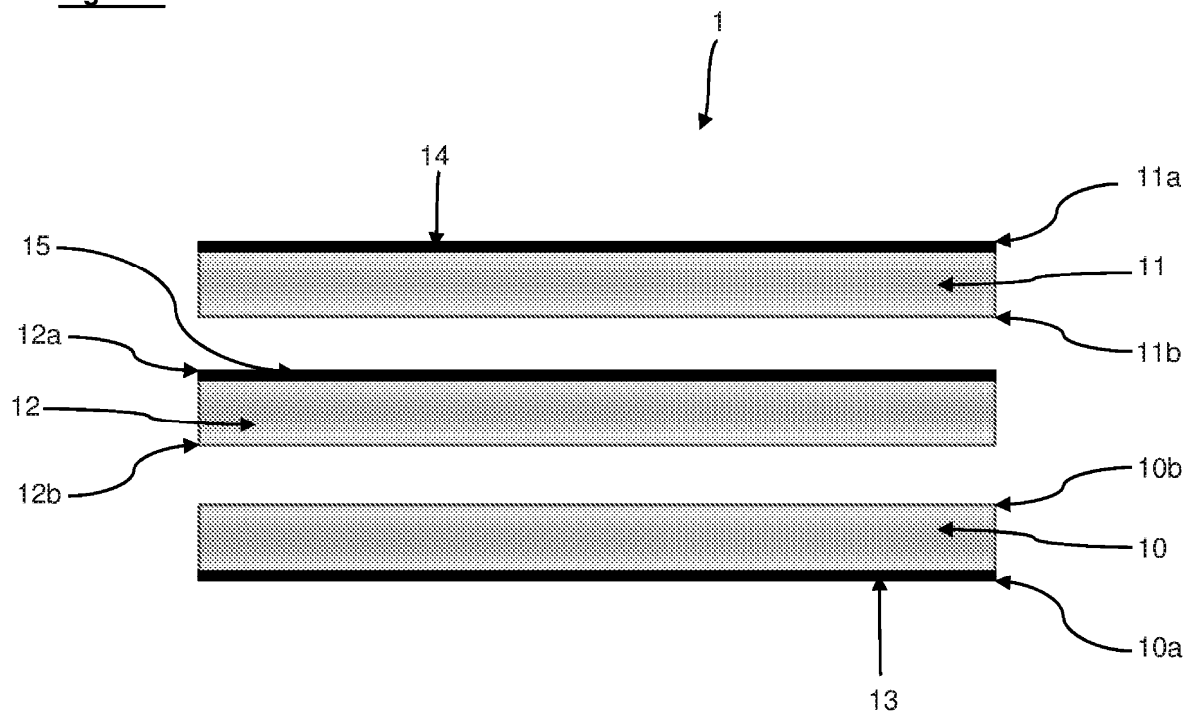


Figura 2

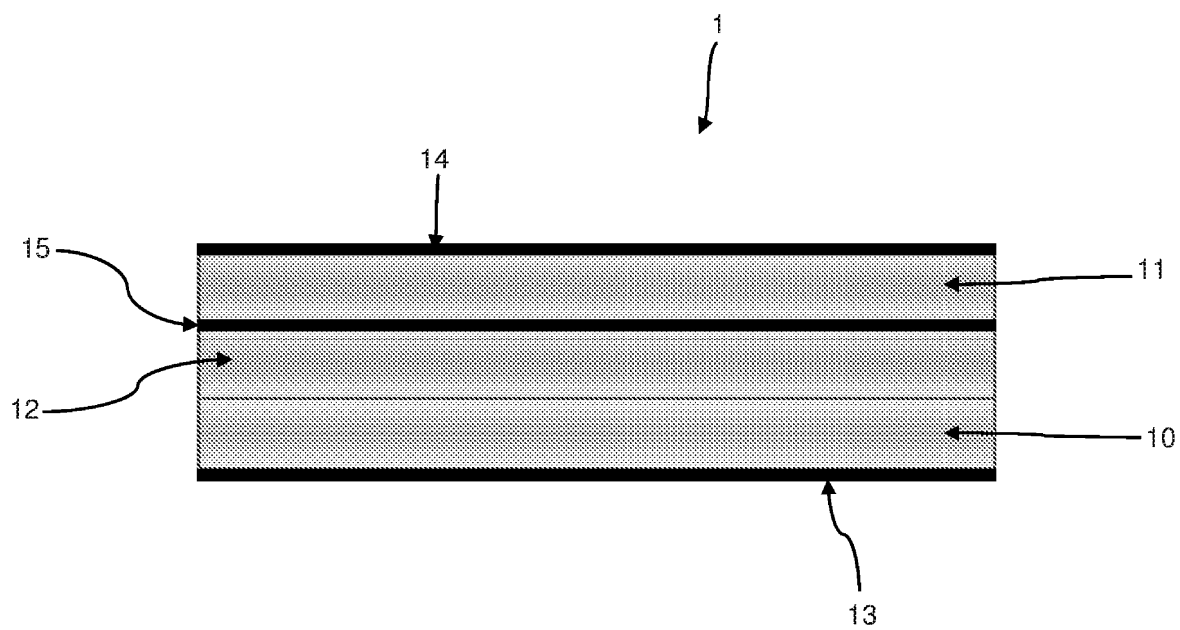


Figura 3

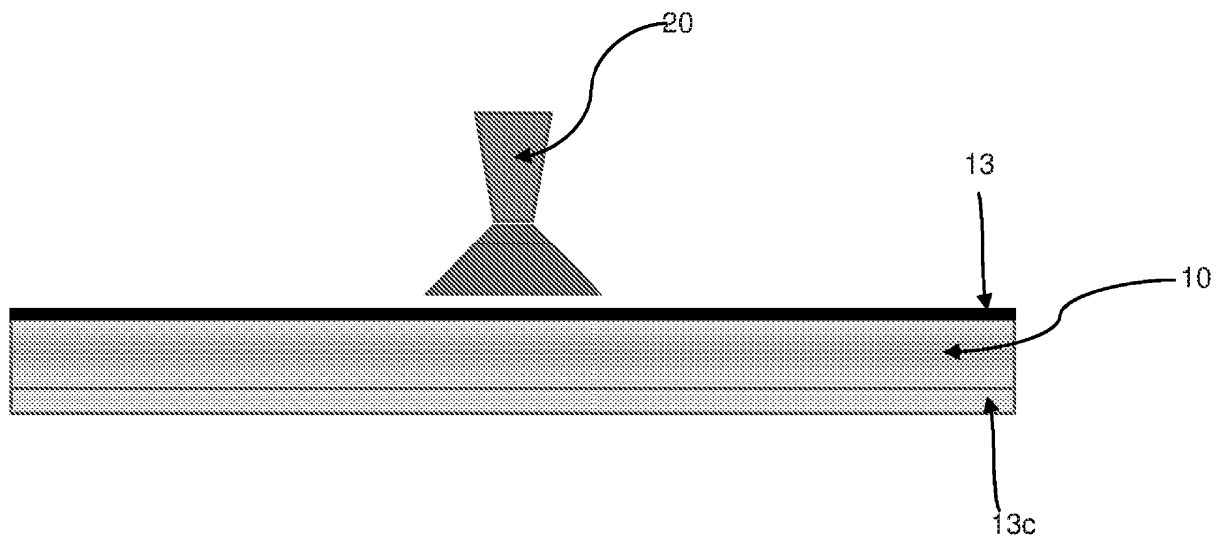


Figura 4

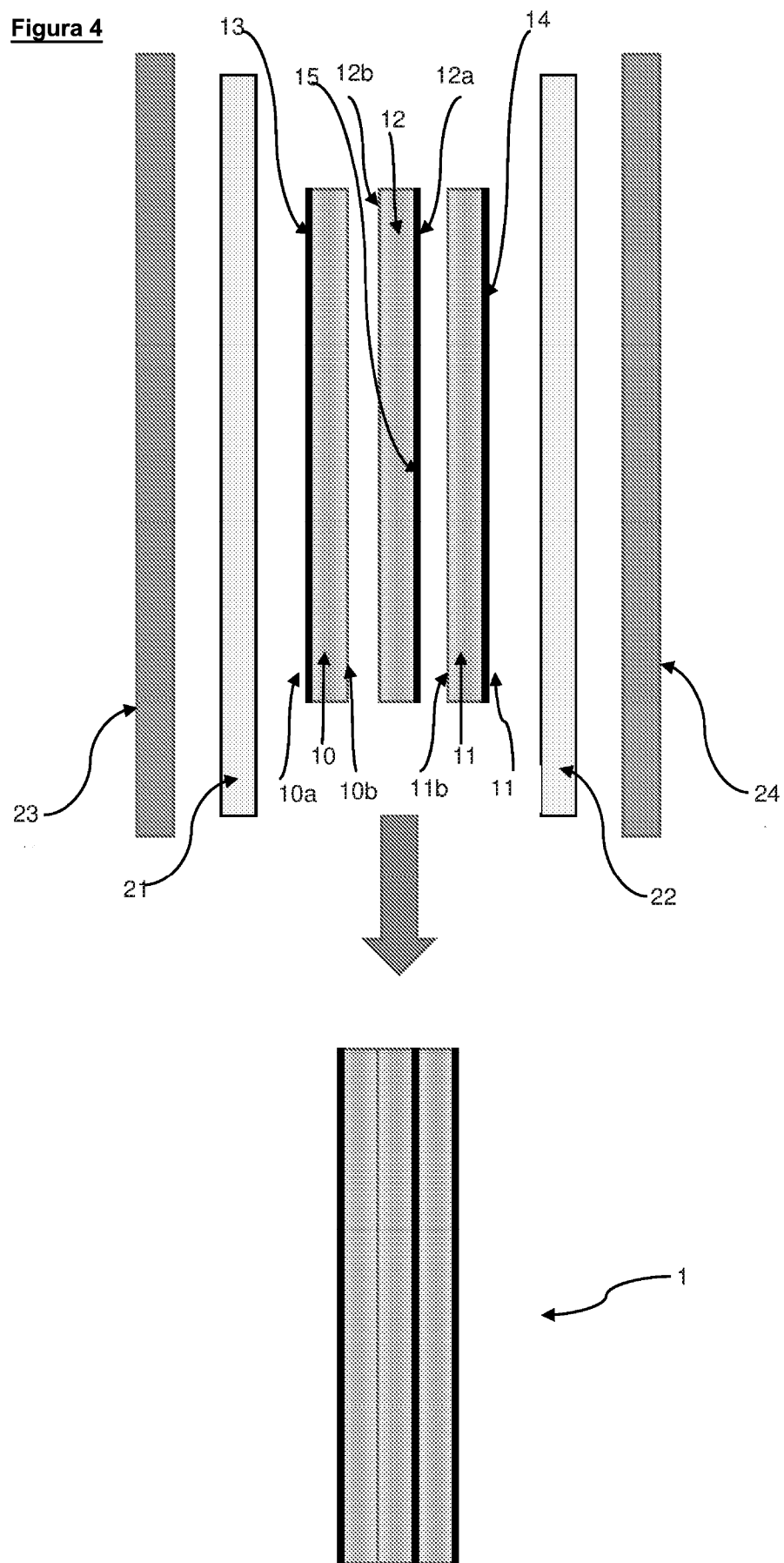


Figura 5

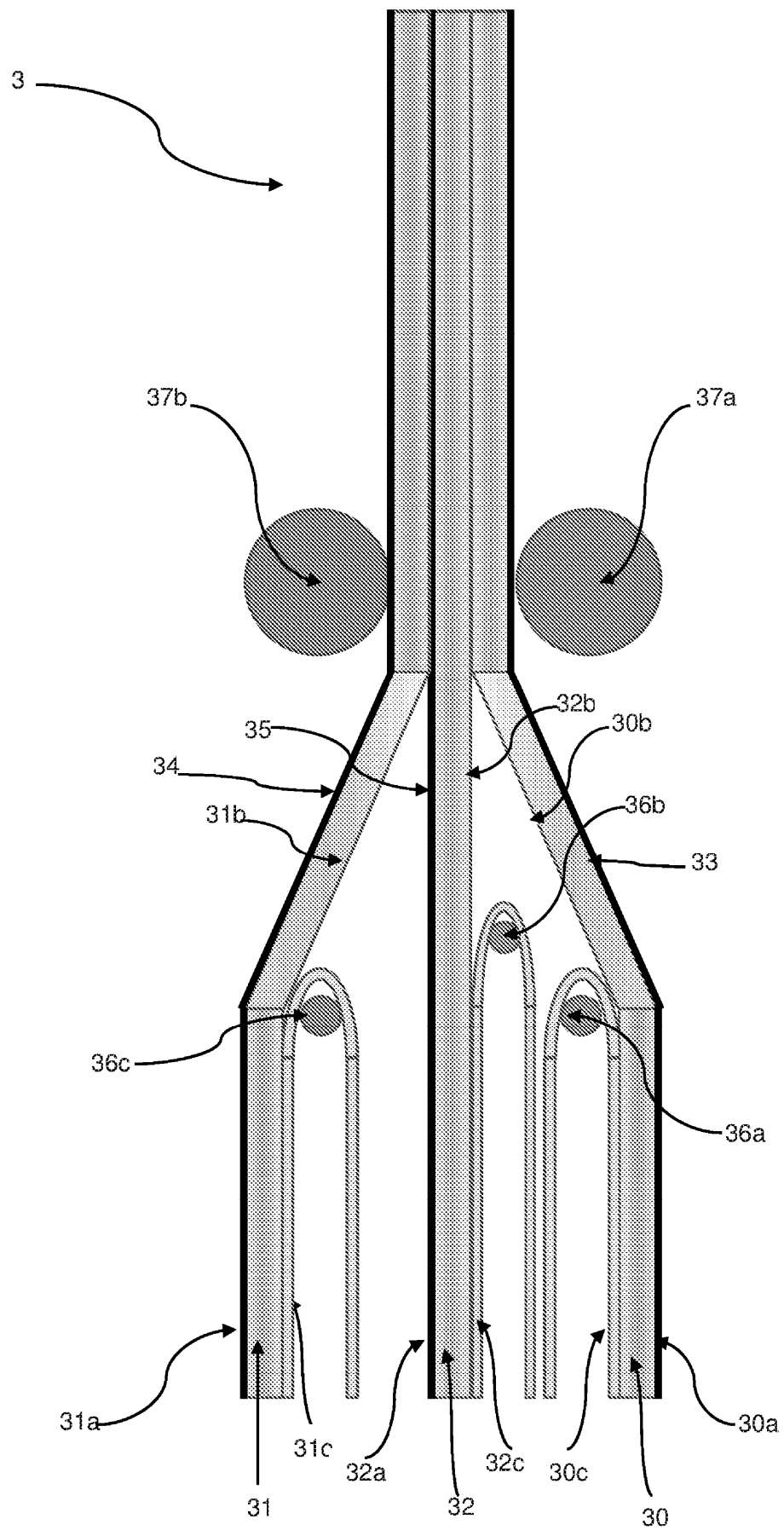


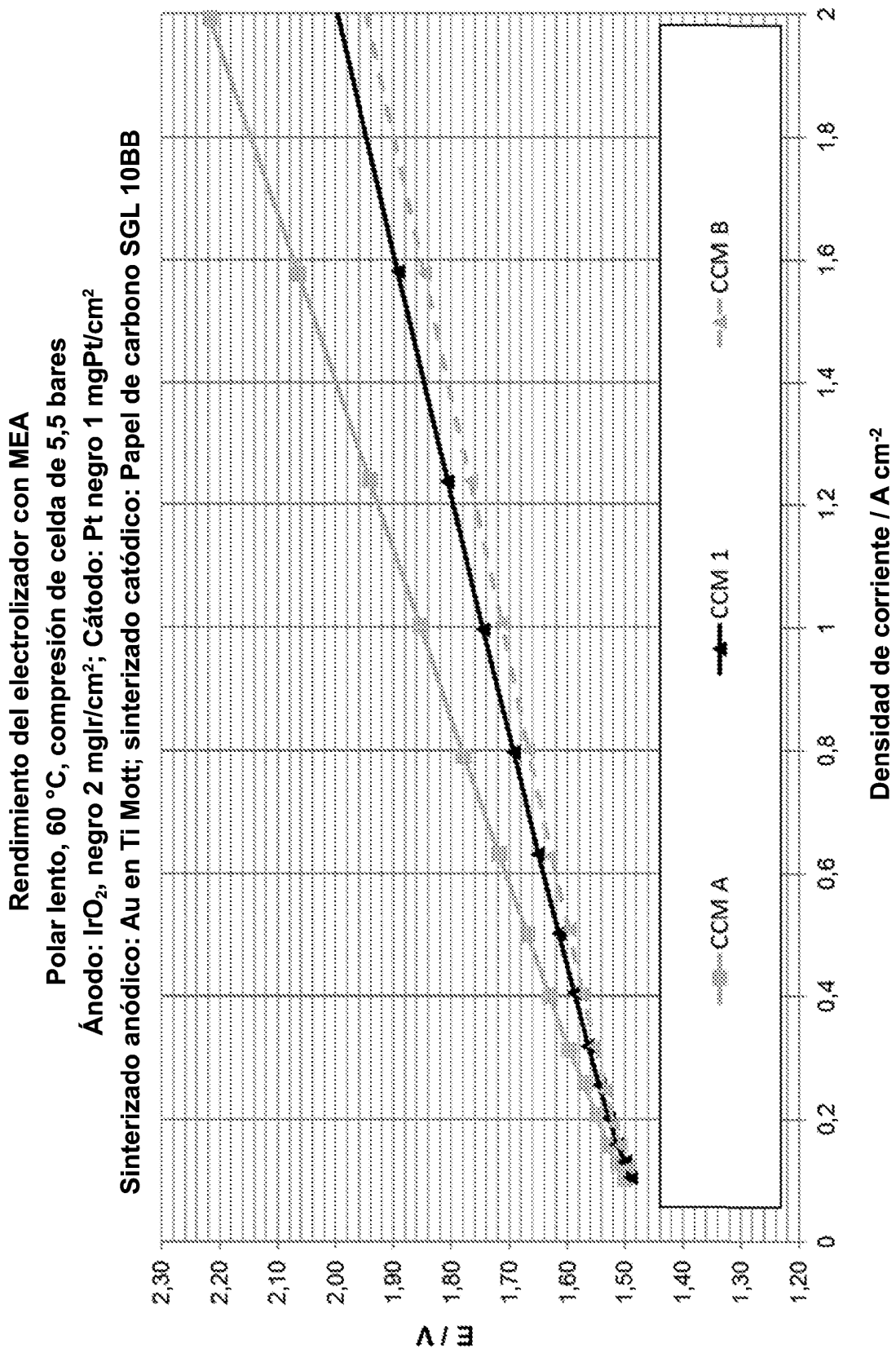
Figura 6

Figura 7

