



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 358 951**

51 Int. Cl.:
F03G 7/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07872583 .5**

96 Fecha de presentación : **26.07.2007**

97 Número de publicación de la solicitud: **2049791**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **22.04.2009**

54 Título: **Actuador electroquímico.**

30 Prioridad: **26.07.2006 US 833412 P**
26.04.2007 US 796138

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
17.05.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
17.05.2011

73 Titular/es:
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
77 Massachusetts Avenue
Cambridge, Massachusetts 02139, US

72 Inventor/es: **Chiang, Yet-Ming;**
Cima, Michael, J. y
Chin, Timothy

74 Agente: **Lehmann Novo, María Isabel**

ES 2 358 951 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

Actuador electroquímico

Campo de la Invención

5 La presente invención proporciona sistemas y dispositivos que implican actuación electroquímica.

Antecedentes de la Invención

10 La actuación se refiere generalmente a un mecanismo mediante el cual un objeto, o una porción de un objeto, se puede ajustar o mover convirtiendo energía (por ejemplo, energía eléctrica, energía química, etc.) en energía mecánica. Los actuadores se pueden categorizar por la manera en la que se convierte la energía. Por ejemplo, los actuadores electrostáticos convierten fuerzas electrostáticas en fuerzas mecánicas.

15 La actuación piezoeléctrica proporciona un elevado ancho de banda y autoridad de actuación, pero baja tensión (típicamente mucho menor que 1%), y requiere voltajes de actuación elevados. Las aleaciones con memoria de forma (SMA), los magnetostrictores, y las aleaciones con memoria de forma ferromagnéticas (FSMA) recientemente desarrolladas, son capaces de mayor tensión, pero producen respuestas más lentas, limitando su aplicabilidad. Los mecanismos de actuación que se basan en el movimiento de dominios inducidos por campos (piezos, FSMA) también tienden a tener bajo esfuerzo bloqueado. Los métodos de actuación anteriores se basan en el uso de materiales activos de alta densidad (óxidos a base de plomo, aleaciones metálicas), que impactan de forma negativa los factores de calidad basados en peso. De este modo, existe la necesidad de una tecnología capaz de proporcionar elevada densidad de energía de actuación, elevada autoridad de actuación (esfuerzo), gran tensión libre, y anchura de banda útil.

20 Se han descrito previamente ciertos métodos de actuación que usan electroquímica, en los que los materiales de actuación que soportan cargas están en fase gaseosa o líquida y se puede esperar que tengan un módulo elástico bajo y consiguientemente baja densidad de energía de actuación y esfuerzo de actuación, en comparación con el enfoque de la presente invención. A pesar de la observación de desplazamiento, el trabajo mecánico no se ha demostrado.

25 El documento EP 1621875 A se considera como la técnica anterior más próxima para la materia objeto de la reivindicación 1.

30 En consecuencia, se necesitan métodos y dispositivos mejorados.

Sumario de la Invención

La invención se refiere a un actuador electroquímico como se define en la reivindicación 1. Otras realizaciones ventajosas se citan en las reivindicaciones dependientes.

35 La presente invención se refiere a sistemas actuadores construidos y dispuestos para ser desplazados desde una primera orientación hasta una segunda orientación, que comprenden al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo y un electrodo positivo, en la que uno o ambos de los electrodos negativo y positivo es un actuador, y comprende una primera porción y una segunda porción, y en la que, con la carga y/o descarga, una especie se intercala, desintercala, se alea con, oxida, reduce, o se galvaniza con la primera porción en un grado diferente que con la segunda porción, y experimenta un cambio dimensional resultante con relación a la segunda porción, impartiendo de ese modo al actuador una tensión diferencial entre las porciones primera y segunda, provocando un desplazamiento de al menos una porción del actuador, desplazamiento del actuador el cual realiza trabajo mecánico sin la necesidad de estar acoplado a una estructura que realiza dicho trabajo.

40 La presente invención también se refiere a sistemas actuadores construidos y dispuestos para ser desplazados desde una primera orientación hasta una segunda orientación, que comprenden al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo y un electrodo positivo, en la que uno o ambos de los electrodos negativo y positivo es un actuador, y comprende una primera porción y una segunda porción, y en la que, con la carga y/o descarga, una especie se intercala, desintercala, o se alea con la primera porción en un grado diferente que con la segunda porción, y experimenta un cambio dimensional resultante con relación a la segunda porción, impartiendo de ese modo al actuador una tensión diferencial entre las porciones primera y segunda, provocando el desplazamiento de al menos una porción del actuador, desplazamiento del actuador el cual realiza trabajo mecánico sin la necesidad de estar acoplado a una estructura que realiza dicho trabajo.

La presente invención también se refiere a sistemas actuadores construidos y dispuestos para ser desplazados desde una primera orientación hasta una segunda orientación, que comprenden al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo y un electrodo positivo, en la que uno o ambos de los electrodos negativo y positivo es un actuador, y comprende una primera porción y una segunda porción, y en la que con la oxidación y/o reducción de la primera porción en un grado diferente que la segunda porción, y experimenta un cambio dimensional resultante con relación a la segunda porción, impartiendo de ese modo al actuador una tensión diferencial entre las porciones primera y segunda, provocando un desplazamiento de al menos una porción del actuador, desplazamiento del actuador el cual realiza trabajo mecánico sin la necesidad de estar acoplado a una estructura que realiza dicho trabajo.

La presente invención también se refiere a sistemas actuadores construidos y dispuestos para ser desplazados desde una primera orientación hasta una segunda orientación, que comprenden al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo y un electrodo positivo, en la que uno o ambos de los electrodos negativo y positivo es un actuador, y comprende una primera porción y una segunda porción, y en la que, con la carga y/o descarga, se deposita electroquímicamente una especie en la primera porción en un grado diferente que en la segunda porción, y experimenta un cambio dimensional resultante con relación a la segunda porción, impartiendo de ese modo al actuador una tensión diferencial entre las porciones primera y segunda, provocando un desplazamiento de al menos una porción del actuador, desplazamiento del actuador el cual realiza trabajo mecánico sin la necesidad de estar acoplado a una estructura que realiza dicho trabajo.

La presente invención también se refiere a dispositivos actuadores que comprenden al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo, un electrodo positivo, y una especie que se puede intercalar, desintercalar, alear con, oxidar, reducir, o galvanizar con una primera porción de la celda electroquímica en un grado diferente que con una segunda porción de la celda electroquímica, sufriendo de ese modo las porciones primera y/o segunda un cambio dimensional con la descarga, provocando el desplazamiento del actuador que realiza trabajo mecánico, en los que la celda electroquímica está construida y dispuesta para ser cargada en fábrica, y está descargada parcialmente después del uso, o ya no se carga más después de la primera descarga.

La presente invención también se refiere a bombas de infusión que comprenden al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo, un electrodo positivo, y una especie de intercalación, en la que el electrodo negativo y/o positivo sufre un cambio dimensional con la carga y/o descarga, a fin de provocar la infusión de un fluido en un cuerpo.

La presente invención también se refiere a actuadores construidos y dispuestos para ser usados en un marco fisiológico, comprendiendo los actuadores una primera porción adyacente a una segunda porción, en los que la primera porción sufre un cambio dimensional al exponerla a un fluido corporal que comprende una especie, y en los que la intercalación electroquímica resultante de la especie en la primera porción, la desintercalación de la especie de la primera porción, o la oxidación/reducción de la primera porción como resultado del contacto con la especie, imparte un cambio dimensional del actuador.

La presente invención también se refiere a actuadores electroquímicos para administrar un fármaco en un cuerpo, comprendiendo los actuadores electroquímicos al menos un electrodo negativo, al menos un electrodo positivo, y una especie, en los que el actuador electroquímico se somete a un voltaje o corriente aplicada, con lo que la aplicación del voltaje o corriente, o su cese, incluye la intercalación de la especie en al menos un electrodo del actuador electroquímico, dando como resultado un cambio volumétrico o dimensional del actuador electroquímico, y en los que el cambio volumétrico o dimensional da como resultado la administración de un fármaco en un cuerpo.

Breve Descripción de los Dibujos

La FIG. 1 muestra un ejemplo de un sistema actuador (a) sin aplicación de un voltaje o corriente, y (b) con aplicación de un voltaje o corriente, según una realización de la invención.

La FIG. 2 muestra un ejemplo de un sistema actuador (a) sin la aplicación de un voltaje o corriente, y (b) con la aplicación de un voltaje o corriente, para dispensar un fluido en un recipiente para fluidos adyacente, según una realización de la invención.

Las FIGS. 3A-C muestran un sistema actuador que tiene una rigidez suficiente para afectar a la velocidad de desplazamiento y la longitud del recorrido del actuador.

La FIG. 4 muestra un ejemplo de un sistema actuador, según una realización de la invención.

La FIG. 5 muestra otro ejemplo de un sistema actuador, según una realización de la invención.

La FIG. 6 muestra otro ejemplo de un sistema actuador, según una realización de la invención.

La FIG. 7 muestra otro ejemplo de un sistema actuador, según una realización de la invención.

La FIG. 8A muestra un sistema actuador que comprende porciones primera y segunda que están formadas de diferentes materiales.

5 La FIG. 8B muestra un sistema actuador que comprende porciones primera y segunda que están formadas de diferentes materiales, tras la inmersión en agua.

La FIG. 9 muestra un sistema actuador que comprende una capa de Zn (a) en forma de Zn, y (b) con la conversión de Zn en $Zn(OH)_2$, dando como resultado la actuación del sistema actuador.

10 La FIG. 10 muestra otro sistema actuador que comprende una capa de Zn (a) en forma de Zn, y (b) con la conversión de Zn en $Zn(OH)_2$, dando como resultado la actuación del sistema actuador.

La FIG. 11 muestra un sistema actuador que comprende una celda de ion litio, en el que el actuador (a) tiene tensión cero antes de la exposición a un electrolito, y (b) sufre actuación tras la exposición al electrolito.

15 La FIG. 12 muestra una celda de ion litio o una celda de hidruro metálico de níquel ensamblada en (a) el estado cargado, y (b) con descarga espontánea tras emergencia en un electrolito.

La FIG. 13 muestra un sistema actuador que comprende dos porciones diferentes (a) antes de la exposición a un electrolito, y (b) con la exposición a un electrolito, en el que el sistema sufre flexión o abarquillado.

20 La FIG. 14 muestra un sistema actuador que comprende dos porciones diferentes (a) antes de la exposición a un electrolito, y (b) con la exposición a un electrolito, en la que el sistema sufre flexión o abertura de la estructura.

La FIG. 15 muestra un sistema actuador que tiene una estructura alabeada (a) antes de la exposición a una especie, y (b) con la exposición a una especie, en la que el sistema sufre actuación.

25 La FIG. 16 muestra un diseño esquemático para una bomba electroquímica autoalimentada energéticamente.

La FIG. 17 muestra una gráfica de la curva de desplazamiento frente al tiempo para un actuador que cambia de forma autoalimentado, con amplificación de la tensión acumulada.

La FIG. 18 muestra una gráfica de la curva de desplazamiento para un actuador que cambia de forma electroquímico controlado por un ciclo de trabajo de 20%.

30 La FIG. 19 muestra un perfil de descarga galvanostática de un actuador electroquímico bimórfico que utiliza una hoja metálica de estaño de 0,10 mm de grosor unida a una hoja metálica de cobre.

La FIG. 20 muestra un perfil de descarga galvanostática de una celda bimórfica electroquímica que utiliza una hoja metálica de estaño de 0,05 mm de grosor unida a cobre.

35 Otros aspectos, realizaciones y características de la invención serán manifiestos a partir de la siguiente descripción detallada cuando se considera conjuntamente con los dibujos que se acompañan. Las figuras que se acompañan son esquemáticas y no pretenden estar dibujadas a escala. Para los fines de claridad, no todos los componentes están etiquetados en cada figura, ni se muestra cada componente de cada realización de la invención cuando la ilustración no es necesaria, para permitir a aquellos de pericia normal en la técnica comprender la invención. Todas las solicitudes de patentes y patentes incorporadas aquí como referencia se incorporan como referencia en su totalidad. En caso de conflicto, prevalecerá la presente memoria descriptiva, incluyendo las definiciones.

40

Descripción Detallada

La presente invención proporciona generalmente sistemas y dispositivos que implican actuación electroquímica.

45 En algunos casos, la presente invención proporciona sistemas (por ejemplo, sistemas actuadores) que pueden comprender al menos un componente, en los que la aplicación de un voltaje o corriente al componente puede generar un cambio volumétrico o dimensional del componente. En algunos casos, el cambio volumétrico o dimensional puede producir trabajo mecánico. En algunas realizaciones, al me-

nos una porción del sistema puede estar construida y dispuesta para ser desplazada desde una orientación hasta otra orientación. El sistema también puede estar asociado con otra estructura, de forma que un cambio volumétrico o dimensional del sistema puede afectar a la orientación, forma, tamaño, volumen, u otra característica de la estructura. Los sistemas tales como estos pueden ser útiles en diversas aplicaciones, incluyendo bombas (por ejemplo, bombas de infusión) y dispositivos de suministro de fármacos, por ejemplo.

En algunas realizaciones, el sistema puede comprender una especie asociada con uno o más componentes (por ejemplo, electrodos) durante el funcionamiento del sistema. La especie, tal como un ion, puede ser capaz de interactuar con una o más porciones del dispositivo. Algunas realizaciones de la invención pueden implicar la interacción de una especie con uno o más electrodos del dispositivo, generando un cambio volumétrico o dimensional en el electrodo. Como se usa aquí, un “cambio volumétrico o dimensional” se refiere a la expansión, contracción, y/u otro desplazamiento de un sistema o porción de un sistema. El cambio volumétrico o dimensional puede comprender una o más cantidades de expansión, contracción, alargamiento, acortamiento, retorcimiento, flexión, cizallamiento, u otro desplazamiento en una o más dimensiones. En algunos casos, el cambio volumétrico o dimensional puede ser isotrópico. En algunos casos, el cambio volumétrico o dimensional puede ser anisotrópico. Tales cambios se pueden emplear para trabajo mecánico, es decir, actuación. Los sistemas pueden sufrir cualquier intervalo de cambios volumétricos o dimensionales que pueden ser adecuados para una aplicación particular. Por ejemplo, se puede colocar un sistema actuador en contacto con un recipiente para fluidos, y se puede expandir y contraer de manera que el sistema sirve como un dispositivo de bombeo para dispensar fluido desde el recipiente para fluidos.

En algunas realizaciones, la presente invención proporciona un actuador electroquímico que comprende al menos una celda electroquímica que incluye un ánodo, un cátodo, y una especie (por ejemplo, ion litio), en el que la celda electroquímica sufre un cambio volumétrico o dimensional al aplicarle un voltaje o corriente. En algunas realizaciones, el actuador electroquímico también comprende una estructura que incluye al menos una porción construida o dispuesta para ser desplazada desde una primera orientación hasta una segunda orientación, por ejemplo mediante el cambio volumétrico o dimensional de una o una pluralidad de celdas electroquímicas. A medida que se desplaza la porción de la estructura, se produce trabajo mecánico. Como se explica con más detalle más abajo, una variedad de sistemas pueden ser actuados mediante el cambio volumétrico o dimensional de una celda electroquímica.

Como se usa aquí, un sistema actuador “construido y dispuesto para ser desplazado” se refiere a un sistema actuador que puede alterar la orientación del sistema, es decir, a través del desplazamiento (por ejemplo, actuación) de al menos una porción del sistema, que afecta al comportamiento del sistema o estructura asociada con el sistema en su fin pretendido. Aquellos de pericia normal en la técnica entenderán el significado de esta expresión. En una realización ilustrativa, un sistema actuador se puede colocar adyacente a una estructura tal como un recipiente o depósito para fluidos, en el que el sistema actuador está construido y dispuesto de forma que el movimiento u otro desplazamiento del sistema afecta a la posición, forma, tamaño, u otra característica del recipiente para fluidos para bombear o dispensar fluido desde el recipiente para fluidos.

Ventajosamente, el desplazamiento de un sistema, o una porción de un sistema, desde una primera orientación hasta una segunda orientación se puede lograr mediante una variedad de métodos, por ejemplo flexión, abarquillado, retorcimiento, alargamiento, y contracción, que se puede alterar, por ejemplo, variando la composición material del sistema, la configuración de una o más celdas electroquímicas del sistema, el voltaje o corriente aplicada, el ciclo de trabajo, u otros parámetros de funcionamiento, como se describe de forma más completa más abajo. En los casos en los que el sistema está asociado con una estructura, el desplazamiento del sistema se puede alterar, por ejemplo, cambiando la colocación de la celda electroquímica en relación con la estructura a desplazar, la forma de la estructura, cualesquiera materiales en relación de funcionamiento entre la celda y la estructura, y/o las composiciones de los materiales de los componentes. En algunos casos, el desplazamiento puede comprender un desplazamiento lineal de una porción del sistema. En algunos casos, el desplazamiento puede comprender el abarquillado de una porción del sistema. Por ejemplo, el sistema puede comprender una porción con forma de disco que puede tener una primera orientación plana, y, con la actuación, la porción con forma de disco se puede desplazar, vía abarquillado, hasta una segunda orientación hemiesférica, no plana.

Adicionalmente, el grado de desplazamiento de una estructura, o una porción de una estructura, se puede personalizar con respecto a la aplicación particular. Por ejemplo, en algunas realizaciones, las celdas electroquímicas de la invención pueden provocar el desplazamiento de una estructura, o una porción de una estructura, por ejemplo, mayor que 5 grados, mayor que 10 grados, mayor que 20 grados, mayor que 30 grados, o mayor que 40 grados. Dependiendo de la aplicación particular, en otras realizaciones, las celdas electroquímicas pueden provocar un desplazamiento, por ejemplo, mayor que 1 cm,

mayor que 10 cm, mayor que 20 cm, mayor que 50 cm, o mayor que 1 m.

En algunos casos, se puede usar el desplazamiento volumétrico o dimensional de una celda electroquímica al cargarla o descargarla para llevar a cabo un desplazamiento físico del sistema, una porción del sistema, o una estructura adyacente o de otro modo asociada con el sistema. El desplazamiento volumétrico o dimensional (por ejemplo, cambio neto de volumen) puede ser positivo, cero, o negativo durante la carga y/o descarga. En algunos casos, el cambio neto de volumen se puede computar fácilmente a partir de los cambios de volumen que se producen en cada uno de los materiales constituyentes usando datos tabulados para los volúmenes molares de los materiales constituyentes de la celda como una función de su composición o estado de carga, o se puede medir directamente en la celda electroquímica.

Varias estructuras diferentes pueden ser actuadas mediante una celda electroquímica descrita aquí. En algunas realizaciones, la invención proporciona sistemas actuadores (por ejemplo, actuadores electroquímicos) construidos y dispuestos para ser desplazados desde una primera orientación hasta una segunda orientación, con la carga o la descarga. En algunos casos, el sistema actuador se puede construir y disponer para ser alterado desde una primera forma hasta una segunda forma, con la carga o descarga. En algunos casos, el desplazamiento producido por el actuador puede tener el mismo signo (por ejemplo, positivo, negativo) que el cambio volumétrico o dimensional que se produce en la celda electroquímica. Por ejemplo, un desplazamiento positivo (por ejemplo, incremento en la dimensión lineal) puede corresponder a un cambio neto positivo de volumen (por ejemplo, expansión) de la propia celda electroquímica, y un desplazamiento negativo (disminución en la dimensión lineal) puede corresponder a un cambio neto negativo de volumen (contracción) de la propia celda electroquímica. En algunos casos, el desplazamiento producido por el actuador puede no tener el mismo signo que el cambio volumétrico o dimensional que se produce en la celda electroquímica. Por ejemplo, como se describe en los Ejemplos, se puede producir un desplazamiento positivo mediante una celda electroquímica que sufre un cambio neto negativo de volumen. Esto es, el desplazamiento del actuador se puede desacoplar del cambio volumétrico o dimensional de la celda electroquímica.

El sistema actuador puede incluir al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo y un electrodo positivo. El sistema actuador también puede incluir, por ejemplo, más de o igual a 2, más de o igual a 4, más de o igual a 10, más de o igual a 20, o más de o igual a 50 celdas electroquímicas, que se pueden hacer funcionar en serie o en paralelo. En algunas realizaciones, se pueden unir múltiples celdas electroquímicas eléctricamente en paralelo, pero se pueden apilar a fin de incrementar el desplazamiento global mientras se mantiene un voltaje del dispositivo global bajo. En algunas realizaciones, el cambio neto de volumen del actuador electroquímico se usa para llevar a cabo un desplazamiento físico que da como resultado el bombeo o la dispensación de un fluido, o la administración de un fluido a un cuerpo, incluyendo, pero sin limitarse a, un fluido que comprende un fármaco.

En algunas realizaciones, uno o ambos de los electrodos negativo y positivo pueden ser un actuador y pueden cambiar la forma y/o se pueden desplazar desde una primera orientación hasta una segunda orientación, con la carga o descarga de la celda electroquímica. En algunos casos, el sistema actuador puede comprender una primera porción y una segunda porción, opcionalmente en comunicación eléctrica entre sí, en el que la primera porción y una segunda porción sufren un cambio volumétrico o dimensional diferencial, o un desplazamiento diferencial, con la carga o descarga. Por ejemplo, el electrodo o electrodos que sufren el cambio de forma o el desplazamiento pueden comprender una primera porción que impone una restricción mecánica sobre una segunda porción que puede facilitar el desplazamiento del electrodo o electrodos. En algunas realizaciones, una primera porción está en comunicación eléctrica con una segunda porción. En algunas realizaciones, una primera porción no está en comunicación eléctrica con una segunda porción.

En algunos casos, una primera porción y una segunda porción (por ejemplo, que corresponden a electrodos positivo y negativo, respectivamente o viceversa, de la celda electroquímica) pueden estar en forma de capas, que se pueden colocar inmediatamente adyacentes entre sí, o, en otras realizaciones, pueden estar separadas entre sí por otro material. En algunas realizaciones, las porciones primera y segunda están unidas entre sí. En algunas realizaciones, las porciones primera y segunda son regiones diferentes de la misma parte del sistema, en las que una porción sufre un cambio volumétrico o dimensional, electroquímicamente inducido, en mayor medida que la otra.

En algunas realizaciones, con la carga y/o descarga, una especie (por ejemplo, una especie de intercalación, un electrón, o una especie galvanizante) se intercala, se desintercala, se alea con, oxida, reduce, o se galvaniza con o en la primera porción en un grado diferente (por ejemplo, en un grado, concentración, tensión, volumen, cambio de forma, u otro cambio, diferente) que la segunda porción. Por ejemplo, la especie se puede intercalar, desintercalar, o alea con, oxidar, reducir, o galvanizar sustancialmente con la primera porción, pero no con la segunda porción, o con la segunda porción en un grado

menor que con la primera porción. Como resultado de la intercalación, desintercalación, o aleación, oxidación, reducción, o galvanización diferencial de la primera porción en un grado diferente que la segunda porción, la primera porción puede experimentar un cambio dimensional resultante, tal como un incremento o disminución en volumen, o una dimensión lineal, o un cambio en la relación de aspecto. Debido a que la segunda porción no se intercala, desintercala, o se alea con, oxida, reduce, o galvaniza la especie, o lo hace en un grado menor que la primera porción, la segunda porción puede no sufrir un cambio dimensional sustancial, o puede no sufrir el mismo cambio dimensional que la primera porción. Como resultado, se proporciona una tensión diferencial (por ejemplo, una tensión opuesta) entre las porciones primera y segunda, lo que puede provocar un desplazamiento (por ejemplo, flexura o flexión interno) de al menos una porción del actuador. El desplazamiento resultante del actuador puede realizar trabajo mecánico sin la necesidad de estar acoplado a una estructura que realiza dicho trabajo. En ciertas realizaciones de la invención, la actuación de un actuador puede incluir la expansión, contracción, flexión, arqueado, abarquillado, plegamiento, enrollamiento, u otras formas de desplazamiento desde una primera orientación hasta una segunda orientación.

En algunos casos, el sistema actuador puede ser en sí mismo una estructura amplificadora de la tensión o desamplificadora de la tensión. Por ejemplo, el sistema actuador, o una porción del mismo (por ejemplo, un electrodo), puede amplificar cualquier desplazamiento que surge, por ejemplo, de un cambio de volumen que se produce en el sistema, o una porción del mismo. En algunas realizaciones, el sistema actuador o dispositivo puede amplificar el desplazamiento que surge debido a un cambio de volumen de un electrodo. El desplazamiento del actuador se puede usar para ejercer una fuerza o para llevar a cabo un desplazamiento de una estructura adyacente al actuador.

Para cualquiera de los sistemas actuadores y dispositivos (por ejemplo, bombas) descritos aquí, aunque el desplazamiento del sistema actuador, o una porción del mismo, se puede usar para realizar trabajo mecánico sin la necesidad de estar acoplado a una estructura que realiza dicho trabajo, en algunos casos el sistema actuador puede estar acoplado a una estructura que realiza trabajo mecánico (por ejemplo, una estructura que amplifica la tensión, una estructura que desamplifica la tensión). En algunos casos, el sistema actuador puede no estar acoplado a una estructura que realiza trabajo mecánico.

En la realización ilustrada en la FIG. 1A se muestra un ejemplo de un sistema actuador. Como se muestra en esta realización ilustrativa, un sistema actuador 110 incluye un electrodo negativo 112 en comunicación eléctrica con un electrodo positivo 114. El electrodo positivo 114 puede incluir una primera porción 116 y una segunda porción 118. En algunas realizaciones, las porciones 116 y 118 están formadas de materiales diferentes. Las porciones 116 y 118 también pueden tener potenciales eléctricos diferentes. Por ejemplo, la porción 116 puede comprender un material que puede intercalar, desintercalar, alearse con, oxidar, reducir, o galvanizar una especie en un grado diferente que la porción 118. La porción 118 puede estar formada de un material que no intercala, desintercala, o se alea con, oxida, reduce, o galvaniza sustancialmente la especie. En algunos casos, la porción 116 se puede formar de un material que comprende uno o más de aluminio, antimonio, bismuto, carbono, galio, silicio, plata, estaño, cinc, u otros materiales que se pueden expandir al intercalar o alea con o formar un compuesto con aluminio. En una realización particular, la porción 116 está formada de un material que comprende aluminio, que se puede expandir al intercalarlo con litio. La porción 118 puede estar formada de cobre, puesto que el cobre no se intercala ni se alea sustancialmente con el aluminio. En algunos casos, la porción 118 puede actuar como un colector de corriente de electrodo positivo, y se puede extender fuera de la celda electroquímica, por ejemplo para formar una lengüeta o un conductor de corriente. En algunas realizaciones, la porción 118 se puede unir a una lengüeta o a un conductor de corriente que se extiende fuera de la celda. El electrodo negativo 112 también puede incluir un colector de corriente. El sistema actuador 110 puede incluir un separador 122. El separador puede ser, por ejemplo, una película separadora porosa, tal como una tela de fibra de vidrio, o un separador de polímero poroso. También se pueden usar otros tipos de separadores, tales como los usados en la construcción de baterías de ion litio. El actuador también puede incluir un electrolito 124, que puede estar en forma de un líquido, sólido, o un gel. El electrolito puede contener una especie electroquímicamente activa, tal como la usada para formar el electrodo negativo. El sistema actuador 110 se puede cerrar herméticamente en un cerramiento 126, tal como un envase de polímero.

Como se ilustra en la realización mostrada en la FIG. 1B, la celda electroquímica puede tener un voltaje 132, de manera que, cuando se forma un circuito cerrado entre los electrodos negativo y positivo, puede fluir una corriente electrónica entre los dos electrodos a través del circuito externo. Si el electrodo negativo 112 es un electrodo de metal de litio, y el electrolito contiene iones litio, puede fluir internamente una corriente de iones litio desde el electrodo 112 al electrodo 114. La intercalación de la porción 116 con litio puede dar como resultado un cambio dimensional, tal como una expansión de volumen. En algunos casos, esta expansión de volumen puede alcanzar al menos 25%, al menos 50%, al menos 75%,

al menos 100%, al menos 150%, al menos 200%, al menos 250%, o al menos 300%, en comparación con el volumen inicial. La expansión de volumen elevada se puede producir, por ejemplo, cuando la porción 116 se satura con litio. A medida que la porción 116 aumenta en volumen debido a la intercalación de litio, la porción 118, a la que puede estar unida la porción 116, puede no expandirse sustancialmente debido a la intercalación mínima o a la ausencia de intercalación de litio. De este modo, la porción 116 proporciona una restricción mecánica. Esta tensión diferencial entre las dos porciones provoca que el electrodo positivo 114 sufra una flexura o flexión. Como resultado del cambio dimensional y desplazamiento del electrodo positivo, el sistema actuador 110 se puede desplazar desde una primera orientación hasta una segunda orientación. Este desplazamiento puede ocurrir tanto si el cambio volumétrico o dimensional (por ejemplo, cambio neto de volumen) de la celda electroquímica, debido a la pérdida de metal de litio desde el electrodo negativo y a la formación de compuesto intercalado con litio o de una aleación de litio en el electrodo positivo, es positivo, cero, o negativo. En algunos casos, el desplazamiento del actuador puede producirse con un cambio volumétrico o dimensional (por ejemplo, cambio neto de volumen) del sistema actuador, o una porción del mismo, que es positivo. En algunos casos, el desplazamiento del actuador se puede producir con un cambio volumétrico o dimensional (por ejemplo, cambio neto de volumen) del sistema actuador, o porción del mismo, que es cero. En algunos casos, el desplazamiento del actuador se puede producir con un cambio volumétrico o dimensional (por ejemplo, cambio neto de volumen) del sistema actuador, o porción del mismo, que es negativo.

Como se usa aquí, "tensión diferencial" entre dos porciones se refiere a la diferencia en respuesta (por ejemplo, actuación) de cada porción individual al aplicar un voltaje o corriente a las dos porciones. Esto es, un sistema como se describe aquí puede incluir un componente que comprende una primera porción y una segunda porción asociada (por ejemplo, puede estar en contacto, puede estar conectada íntegramente a) la primera porción, en el que, en condiciones esencialmente idénticas, la primera porción puede sufrir un cambio volumétrico o dimensional y la segunda porción no sufre ningún cambio volumétrico o dimensional, produciendo tensión entre las porciones primera y segunda. La tensión diferencial puede provocar que el componente, o una porción del mismo, se desplace desde una primera orientación hasta una segunda orientación. En algunos casos, la tensión diferencial se puede producir por intercalación, desintercalación, aleación, oxidación, reducción, o galvanización diferencial de una especie con una o más porciones del sistema actuador.

Por ejemplo, la intercalación, desintercalación, aleación, oxidación, reducción, o galvanización diferencial de la porción 116 con relación a la porción 118 se puede lograr a través de varios medios. (FIG. 1A) En una realización, como se describe anteriormente, la porción 116 se puede formar de un material diferente de la porción 118, en el que uno de los materiales intercala, desintercala, se alea con, oxida, reduce, o galvaniza sustancialmente una especie, mientras que la segunda porción interacciona con la especie en menor medida. En otra realización, la porción 116 y la porción 118 se pueden formar del mismo material. Por ejemplo, la porción 116 y la porción 118 se pueden formar del mismo material y pueden ser sustancialmente densas, o porosas, tales como un polvo prensado o sinterizado o una estructura de espuma. En algunos casos, para producir una tensión diferencial al funcionar la celda electroquímica, la porción 116 ó 118 puede tener suficiente grosor de manera que, durante el funcionamiento de la celda electroquímica, pueda surgir un gradiente de composición debido al transporte iónico limitado, produciendo una tensión diferencial. En algunas realizaciones, una porción o un área de una porción puede estar expuesta preferentemente a la especie con relación a la segunda porción o área de la segunda porción. En otros casos, la protección o enmascaramiento de una porción con relación a la otra porción puede dar como resultado una menor o mayor intercalación, desintercalación, o aleación con la porción enmascarada o protegida en comparación con la porción no enmascarada o protegida. Esto se puede lograr, por ejemplo, mediante un tratamiento superficial o una capa barrera depositada, laminación con un material de capa barrera, o tratando química o térmicamente la superficie de la porción a enmascarar/proteger para facilitar o inhibir la intercalación, desintercalación, aleación, oxidación, reducción, o galvanización con la porción. Las capas barreras se pueden formar de cualquier material adecuado, que puede incluir polímeros, metales, o cerámica. En algunos casos, la capa barrera también puede servir para otra función en la celda electroquímica, tal como ser un colector de corriente. En algunas realizaciones, la capa barrera se puede depositar uniformemente sobre la superficie. En otros casos, la capa barrera puede formar un gradiente en composición y/o dimensión, de manera que sólo ciertas porciones de la superficie facilitan o inhiben preferentemente la intercalación, desintercalación, aleación, oxidación, reducción, o galvanizado de la superficie. Son posibles los gradientes lineales, por etapas, exponenciales, y otros gradientes. En algunas realizaciones, se puede usar una variación en la porosidad a lo largo de la porción 116 ó 118, incluyendo la preparación de una capa de superficie densa, para ayudar a crear un gradiente de concentración de iones y tensión diferencial. La invención también contempla otros métodos de interacción de una especie con una primera porción en un grado diferente para inducir una tensión diferencial entre las porciones primera y segunda. En algunas realizaciones, la flexura o flexión de un electrodo se usa para ejercer una fuerza o para llevar a cabo un desplazamiento que logra una función útil, como se describe con más detalle más abajo.

En varias realizaciones descritas aquí, las porciones primera y segunda se pueden describir como formadas de diferentes materiales, que da como resultado diferentes características y propiedades. Se debería entender que, para cualquiera de las realizaciones descritas aquí, la primera porción y la segunda porción también pueden estar formadas de sustancialmente el mismo material. En los casos en los que la primera porción y la segunda porción pueden estar formadas del mismo material, las porciones primera y segunda pueden tener opcionalmente al menos una característica que difiera, tal como dimensión, grosor, porosidad, o similar, que puede producir la intercalación, desintercalación, aleación, oxidación, reducción, o galvanización diferencial, dando como resultado una tensión diferencial. Por ejemplo, las porciones primera y segunda pueden comprender el mismo material pero pueden tener diferentes porosidades, dando como resultado un gradiente de porosidad a lo largo de las porciones primera y segunda. En algunos casos, la primera porción puede comprender un material poroso (por ejemplo, polvo compacto, espuma) que tiene una primera densidad, y la segunda porción puede comprender el material poroso que tiene una segunda densidad, diferente de la primera densidad.

Como se describe aquí, algunas realizaciones de la invención implican la interacción de una especie con uno o más electrodos. Por ejemplo, el electrodo o electrodos se pueden intercalar con la especie. En algunas realizaciones, durante la operación del sistema actuador o dispositivo, un electrodo puede obtener una concentración que varía espacialmente de la especie, dando como resultado una tensión diferencial, produciendo el desplazamiento de al menos una porción del sistema o dispositivo. Esto es, la especie se puede intercalar, por ejemplo, en una porción del electrodo en un mayor grado que en una segunda porción del electrodo, dando como resultado una tensión diferencial.

Los actuadores de la invención, o sus porciones (por ejemplo, electrodos), especialmente aquellos que incluyen al menos una primera porción que puede intercalar, desintercalar, alearse con, oxidar, reducir, o galvanizar una especie en un grado diferente que una segunda porción, pueden tener cualquier forma adecuada tal como una chapa, lámina, tira, lámina o tira plegada, haz, copa, varilla, tubo, cilindro, etc., en tanto que pueda ser desplazada desde una primera orientación hasta una segunda orientación, que se pueden usar para lograr una función deseada. En algunos casos, al menos una porción del actuador puede estar perforada, y/o puede tener múltiples "piernas" o "brazos" o ramificaciones. En algunos casos, el electrodo positivo y/o negativo no es plano. Por ejemplo, el electrodo positivo y/o negativo puede ser una chapa o pelete, u otra forma no plana. En algunas realizaciones, el electrodo positivo y/o negativo puede tener cualquier forma y puede comprender al menos una ranura, en el que la ranura o ranuras pueden facilitar y/o guiar el desplazamiento del sistema actuador, o una porción del mismo. Por ejemplo, un electrodo puede estar ranurado o estampado para facilitar, guiar o dirigir la manera en la que el electrodo se mueve desde una primera orientación hasta una segunda orientación. En algunos casos, el electrodo se puede plegar a lo largo de al menos una ranura con la actuación.

Los actuadores de la invención pueden oscilar en tamaño desde la escala nanométrica hasta la escala micrométrica, y hasta la escala macroscópica. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el sistema actuador 110 puede tener al menos una dimensión menor o igual a 1 metro, menor o igual a 10 centímetros, menor o igual a 1 centímetro, menor o igual a 1 milímetro, menor o igual a 100 micrómetros, menor o igual a 10 micrómetros, menor o igual a 1 micrómetro, menor o igual a 100 nanómetros, o menor o igual a 10 nanómetro.

Un electrodo de un actuador también puede oscilar en tamaño desde la escala nanométrica, hasta la escala micrométrica, y hasta la escala macroscópica. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el electrodo 114 puede tener al menos una dimensión menor o igual a 1 metro, menor o igual a 10 centímetros, menor o igual a 1 centímetro, menor o igual a 1 milímetro, menor o igual a 100 micrómetros, menor o igual a 10 micrómetros, menor o igual a 1 micrómetro, menor o igual a 100 nanómetros, o menor o igual a 10 nanómetro.

Los actuadores (incluyendo electrodos) que incluyen una primera porción que puede se intercalar, desintercalar, alear con, oxidar, reducir, o galvanizar con una especie en un grado diferente que una segunda porción pueden estar formados de cualquier material adecuado en cualquier forma adecuada que permita la interacción con dicha especie (por ejemplo, un material dimensionalmente activo). En algunas realizaciones, la primera porción se forma de un material poroso que cambia la dimensión con el intercambio de iones. El cambio de dimensión puede ser una expansión o contracción de volumen relativamente uniforme, o puede ser un modo de deformación de tipo flexura o flexión o abarquillado que resulta de la introducción de tensión diferencial, como se describe aquí. El material poroso puede ser un polvo prensado compacto o una espuma metálica o material compuesto del material dimensionalmente activo. La segunda porción puede estar formada de un material no dimensionalmente activo. Las porciones primera y segunda pueden comprender adicionalmente aditivos tales como un aglutinante o un aditivo conductor tal como carbono o un metal. El material dimensionalmente activo puede comprender, por ejemplo, una o más de las siguientes especies: Al, Au, Ag, Ga, Si, Ge, Ti, Sn, Sb, Pb, Zn, carbono, grafito, carbono

duro, carbono mesoporoso, un óxido, un óxido de intercalación, un óxido estratificado, arcilla mineral, sulfuro, sulfuro estratificado, TiS_2 , MoS_2 , y WS_2 . Se debería entender que los actuadores de la invención también pueden comprender otros metales, compuestos que contienen metales, materiales inorgánicos, y similares.

5 En algunos casos, los actuadores de la invención pueden sufrir un cambio dimensional proporcionado por un electrodo poroso que cambia de dimensión con el intercambio iónico. En algunos casos, el electrodo poroso, con la carga o descarga, sufre un cambio de dimensión que comprende pandeo, flexión, o abarquillado. En algunas realizaciones, el electrodo poroso puede comprender un gradiente de porosidad, en el que una primera porción del electrodo poroso tiene una porosidad que es diferente de la porosidad de una segunda porción del electrodo poroso. En algunos casos, el electrodo poroso comprende además una capa superficial en contacto con el electrodo poroso, en el que la capa superficial se intercala, desintercala, alea con, oxida, reduce, o galvaniza en un mayor grado que el electrodo poroso (subyacente). La capa superficial puede cubrir o encapsular parcial o sustancialmente la superficie más externa del electrodo poroso, de forma que la capa superficial puede estar principal y/o directamente expuesta a otros componentes del sistema. En algunos casos, la capa superficial se puede intercalar o alea en mayor medida que el electrodo poroso subyacente. En algunos casos, la capa superficial puede tener una densidad mayor que el electrodo poroso subyacente.

20 En algunos casos, una especie que puede intercalar, desintercalar, alearse con, oxidar, reducir, o galvanizar al menos una porción de un actuador (por ejemplo, una porción de un electrodo), puede estar en forma de un ion. Los ejemplos no limitantes de iones incluyen un protón, ion hidróxido, ion sulfato, ion clorato, ion fosfato, y un ion nitrato. En otros casos, la especie puede comprender un metal alcalino o un metal alcalino-térreo. En ciertas realizaciones, la especie es un electrón, que puede provocar la oxidación o reducción de al menos una porción de una superficie. En otras realizaciones, la especie es una especie galvanizante, que se puede depositar electroquímicamente en la primera porción en un grado diferente que en la segunda porción. En algunos casos, la especie se puede seleccionar del grupo que consiste en un protón, ion alcalino, litio, complejo iónico, ion hidroxilo, ion carbonato, ion clorato, ion sulfato, ion fosfato, otros complejos iónicos multiatómicos, y similares. En algunos casos, la especie se selecciona del grupo que consiste en un protón, ion alcalino, complejo iónico, ion hidroxilo, ion carbonato, ion clorato, ion sulfato, e ion fosfato. En algunos casos la especie es un protón.

30 La especie puede estar inicialmente presente en una celda electroquímica en forma de un sólido, tal como el material usado para formar la especie activa de los electrodos positivo o negativo. En otros casos, la especie puede estar en forma de un sólido que se lamina a uno de los electrodos, pero no es una parte del material activo del electrodo. En otra realización, la especie puede estar en forma de una fuente iónica sólida separada, tal como un electrolito sólido. En todavía otra realización, la especie puede estar presente en forma de un líquido o un gel, por ejemplo como un electrolito, y puede estar presente en la celda electroquímica antes de la primera carga/descarga de la celda. En otras realizaciones, estas especies pueden estar presentes en una sustancia exterior a la celda electroquímica. Por ejemplo, la especie puede estar presente en el entorno en el que se usa el actuador. En una realización particular, el actuador se diseña para sumergirlo en un fluido que contiene una especie que puede intercalar, alearse con, oxidar, reducir, o galvanizar una porción de un electrodo de la celda electroquímica. Por ejemplo, el fluido puede ser un fluido corporal, y la especie puede ser una especie iónica presente en el fluido corporal.

45 En algunos casos, un dispositivo de la invención puede comprender un ánodo, cátodo, e iones litio como la especie. Al aplicar un campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo, el dispositivo se puede cargar y descargar reversiblemente. En algunos casos, al cargarlo, los iones litio se pueden insertar en el ánodo de forma que el ánodo sufre un cambio volumétrico o dimensional con relación al cátodo, que permanece esencialmente sin cambio en el volumen o dimensión. Al descargarlo, los iones litio se pueden transportar desde el ánodo al cátodo, de manera que los iones litio se insertan en el cátodo. Como resultado, el ánodo puede volver a su volumen/forma antes de la carga, y el cátodo puede sufrir un cambio volumétrico o dimensional con relación al ánodo. En algunos casos, tanto el ánodo como el cátodo, ya sea simultánea o no simultáneamente, pueden sufrir un cambio volumétrico o dimensional con el ciclo de carga/descarga. En algunos casos, sólo uno del ánodo y cátodo puede sufrir un cambio volumétrico o dimensional con el ciclo de carga/descarga.

55 Los actuadores de la invención se pueden usar en una variedad de aplicaciones. Por ejemplo, los actuadores se pueden usar en dispositivos microfluídicos, en los que, por ejemplo, se pueden realizar funciones de conmutación y de control por medio de válvulas por el actuador. En otros casos, el actuador se puede usar como una bomba para hacer que un fluido fluya en un canal o fuera de un orificio, incluyendo una bomba para el suministro controlado de un fármaco. En otras realizaciones, un actuador puede ser parte de un dispositivo médico externo o implantable. La especie que se puede intercalar, desinterca-

lar, oxidar, reducir, o galvanizar con al menos una porción del actuador (por ejemplo, una porción de un electrodo) puede ser parte de la celda electroquímica en algunas realizaciones (por ejemplo, en la fabricación antes del uso); sin embargo, en otras realizaciones puede ser un constituyente del medio en el que se usa el actuador. Los actuadores también pueden ser parte de dispositivos de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS), tales como conjuntos de microespejos en los que se actúan individualmente microactuadores directamente accesibles. En otros casos, uno o más actuadores se pueden construir y disponer para desplegarse en una estructura con la aplicación de una corriente o voltaje. Tales estructuras pueden ser útiles como tiendas o armazones, por ejemplo. En otros casos, un actuador de la invención puede ser un componente de una herramienta quirúrgica o implante médico, que se puede expandir o contraer eléctricamente mediante una entrada eléctrica. Más abajo se describe con más detalle una variedad de aplicaciones.

En algunas realizaciones, los actuadores de la invención se pueden usar para desplazar o deformar una estructura adyacente al actuador. Por ejemplo, como se muestra en la realización ilustrada en la FIG. 2A, el sistema actuador 150 incluye el actuador 151 que sirve como una bomba para dispensar fluido 170 desde un depósito 172. La bomba puede dispensar volúmenes diferentes de fluidos, por ejemplo mayores que 0,01 ml, mayores que 0,01 ml, mayores que 1 ml, mayores que 5 ml, mayores que 10 ml, mayores que 100 ml, mayores que 1 l. El actuador 151 puede funcionar de manera similar al actuador 110 descrito en la FIG. 1. De forma breve, una especie se puede intercalar, desintercalar, alear, oxidar, reducir, o galvanizar con una primera porción 156 del electrodo 154 de una manera no uniforme con relación a la porción 158, de forma que se induce una tensión diferencial entre las porciones primera y segunda. La segunda porción puede ser una restricción mecánica, que provoca flexura o flexión del electrodo 154, y, de forma resultante, flexura o flexión del actuador 151. El depósito 172 adyacente al actuador 151 puede estar formado de un material deformable de manera que la flexura del actuador 151 provoca un incremento en la presión dentro del depósito, forzando a que el fluido 170 sea dispensado desde el depósito, como se muestra en la FIG. 2B. En algunas realizaciones, la velocidad de dispensación o infusión de fluido 170 desde el depósito se puede controlar mediante la tasa y/o grado de desplazamiento (por ejemplo, longitud de recorrido) del actuador desde una primera posición hasta una segunda posición. La velocidad de dispensación se puede controlar de forma que sea constante o variable. La tasa y/o grado de actuación se puede controlar mediante parámetros tales como la amplitud y/o duración de la corriente o voltaje aplicado (por ejemplo, durante la carga o descarga), concentración de la especie a intercalar, desintercalar, alear o galvanizar con un electrodo de la celda electroquímica, y las dimensiones y composiciones materiales de los materiales usados para formar la celda electroquímica, tales como la configuración y composiciones materiales de las porciones primera y segunda del actuador, que interaccionan con la especie en diferentes grados.

Se pueden disponer una o más celdas electroquímicas, opcionalmente en combinación con uno o más componentes, para lograr el desplazamiento de un sistema, o una porción de un sistema. En algunos casos, las celdas electroquímicas que tienen diferentes capacidades de actuación se pueden disponer sobre una superficie en un patrón, en la que cada celda electroquímica se controla de forma independiente. En el contexto de la invención se pueden usar otras configuraciones de celdas, componentes, y/o dispositivos, como se describe en, por ejemplo, la Publicación de Patente U.S. nº2006/0102455, que se basa en la Solicitud de Patente U.S. Serie nº 11/150.477, y la Publicación Internacional nº WO 2005/124918, que se basa en la Solicitud Internacional Serie nº PCT/US/2005/020554.

Los actuadores de la invención se pueden fabricar con diferente rigidez de los materiales, para permitir diferentes intervalos de tasa de actuación y longitud de recorrido. Por ejemplo, un actuador que tiene una longitud grande de recorrido puede estar formado de uno o más materiales que tienen una rigidez relativamente baja. En tal realización, un pulso corto de corriente puede provocar un desplazamiento lento de un actuador desde una primera orientación hasta una segunda orientación. Por el contrario, un actuador formado por uno o más materiales más rígidos se puede desplazar sólo cuando se aplica corriente. En tal realización, el actuador se puede desplazar desde una primera orientación hasta una segunda o tercera orientación con cada incremento de corriente aplicada, en algunos casos, sin importar la carga. En algunas realizaciones, la transferencia de energía desde el actuador a un sistema mecánico se maximiza cuando la rigidez del actuador y de los sistemas mecánicos está a la par. En consecuencia, la elección de materiales del actuador se puede escoger basándose en la aplicación particular y/o el modo de actuación deseado.

Las FIGS. 3A-C muestran un ejemplo de cómo la rigidez de un actuador puede influir en la tasa de desplazamiento y en la longitud de recorrido del actuador. En la realización ilustrada en la FIG. 3A, el actuador 180 incluye una primera porción que puede intercalar, desintercalar, alearse con, oxidar, reducir, o galvanizar una especie en un grado diferente que una segunda porción. El extremo 181 del actuador se puede fijar en una posición, con el actuador en una primera posición a. El actuador puede estar adyacente a un pistón 190 y un depósito 192 que contiene fluido 194. Con la intercalación, desintercalación, alea-

ción, oxidación, reducción, o galvanización no uniforme de una especie (por ejemplo, con la primera porción con respecto a la segunda porción del actuador), el actuador 180 se puede desplazar desde la posición *a* a la posición *c*, como se muestra en la FIG. 3C. El actuador 180 puede estar formado de uno o más materiales que tienen una baja rigidez para lograr una gran longitud de recorrido "ac". Esto se puede lograr, por ejemplo, aplicando un pulso corto de corriente al actuador, de forma que el actuador se desplace, lo que puede provocar el desplazamiento del pistón 190, para dispensar el fluido desde el depósito. Un pulso corto de corriente puede empujar lentamente el fluido fuera del depósito hasta que el actuador se relaja a su nueva posición de equilibrio *c*. Por el contrario, la FIG. 3B muestra el actuador 182 formado por un material de elevada rigidez en una primera orientación, en la que un extremo del actuador está en la posición *b*. Al aplicar una corriente de magnitud y duración similares a la del actuador 180, el actuador 182 se puede desplazar desde la posición *b* hasta la posición *c*, como se muestra en la FIG. 3C. La longitud de recorrido del actuador 182, "bc", es más corta que la longitud de recorrido del actuador 180, "ac", debido a la diferente rigidez de los materiales usados para formar los actuadores 180 y 182. En algunas realizaciones, los actuadores se pueden apilar, por ejemplo en paralelo o en serie, para incrementar la carga o fuerza aplicada a una estructura.

Los siguientes ejemplos ilustran adicionalmente diferentes configuraciones y formas en las que se pueden implementar actuadores de la invención.

En la realización ilustrada en la FIG. 4, el sistema actuador 200 incluye el actuador 210 que incluye un electrodo positivo 212, un electrodo negativo 214, y una capa de electrolito 216 que incluye la especie 218 que se puede intercalar, desintercalar, alear con, oxidar, reducir o galvanizar con el electrodo positivo o negativo. El transporte de la especie a través de la capa de electrolito bajo el voltaje 220 aplicado se puede usar para desplazar el actuador 210 arriba o abajo en las direcciones de las flechas 222 y 224. Este desplazamiento puede dar como resultado la actuación, que, por ejemplo, se puede usar para abrir o cerrar una válvula, desplazar un espejo, bomba, fluido, etc. Como se explica anteriormente, las combinaciones de materiales usados para formar los electrodos positivo y negativo pueden variar. Por ejemplo, los materiales adecuados pueden incluir los materiales activos en una batería de ion litio o de hidruro metálico de níquel. Como se ilustra en esta realización, el sistema actuador 210 se fija en un extremo al sustrato 228. El sustrato puede actuar como una restricción mecánica, de manera que la porción 230 del actuador sufre un desplazamiento mínimo o ningún desplazamiento. Debido a que la porción 232 del actuador no está fija, esta porción sufre un desplazamiento que da como resultado la flexión.

En otra realización, la especie que se puede intercalar, alear con, oxidar, reducir o galvanizar con una porción de un actuador se puede situar de manera que una porción del actuador esté expuesta preferentemente a la especie, mientras que una porción diferente del actuador no esté expuesta, o esté expuesta a la especie en menor grado. Por ejemplo, en la realización ilustrada en la FIG. 5, el sistema actuador 250 incluye el actuador 252 que comprende una porción 254 y una porción 256. La porción 256 puede estar expuesta a la especie 260, que está sumergida en una sustancia 262 (por ejemplo, un electrolito) en mayor grado que la porción 254. La porción 254 y el sustrato 264 pueden ser conductores y pueden servir como los electrodos positivo y negativo. La porción 256 se puede aislar del sustrato 264 por un aislante 266. Al aplicar una diferencia de potencial entre el sustrato (o un contraelectrodo remoto) y la porción 254, la especie 260 se puede intercalar, desintercalar, alear con, oxidar, reducir, o galvanizar la porción 256 en un grado mayor que la porción 254. El tipo de interacción de las porciones 254 y/o 256 con la especie 260 dependerá, por ejemplo, del tipo particular de especie, y de los materiales usados para formar las porciones 254 y 256. Esta interacción puede provocar la flexura del actuador 252 como resultado de la tensión diferencial entre las porciones 254 y 256.

Las estructuras tales como los sistemas actuadores 200 y 250 se pueden fabricar mediante una amplia variedad de métodos, incluyendo la fabricación de MEMS, diversos métodos de deposición de estructuras de películas delgadas, tecnología de revestimiento de película gruesa, métodos de deposición electrodica, y ensamblaje y laminación físicas. También pueden ser adecuados otros métodos de fabricación, y son conocidos por las personas de pericia normal en la técnica.

Como se muestra en la realización ilustrada en la FIG. 6, el sistema actuador 270 incluye un electrodo 272 en comunicación eléctrica con el actuador 276, que puede estar conectado de forma integral (o conectado de forma no integral) al sustrato 274. El actuador 276 puede ser de composición uniforme; sin embargo, la porción 280 puede estar expuesta a la especie 282 en mayor grado que a la porción 284 del actuador. Una exposición diferente (por ejemplo, diferentes áreas de exposición) a la especie puede provocar intercalación, desintercalación, aleación, oxidación, reducción, o galvanización con la porción 280 en un grado diferente que con la porción 284. Esto puede provocar la actuación del actuador, por ejemplo en la dirección de las flechas 222 y 224.

En algunas realizaciones, los actuadores de la invención se construyen y se disponen para ser usados en un marco fisiológico, tal como en un cuerpo. Por ejemplo, algunas realizaciones de la invención

proporcionan actuadores electroquímicos para administrar un fármaco en un cuerpo, que comprenden al menos un electrodo negativo, al menos un electrodo positivo, y una especie como se describe aquí, en los que el actuador electroquímico se puede someter a un voltaje o corriente aplicada, con lo que la aplicación del voltaje o corriente, o su cese, incluye la intercalación de la especie en al menos un electrodo del actuador electroquímico, dando como resultado un cambio volumétrico o dimensional del actuador electroquímico. En algunos casos, el cambio volumétrico o dimensional puede ser útil en la administración de un fármaco a un cuerpo, o un fluido que comprende un fármaco en un cuerpo, por ejemplo vía métodos de dispensación o infusión, y otros métodos, como se describe aquí.

En algunos casos, el actuador está sumergido en un fluido corporal (por ejemplo, sangre, orina, sudor, etc.) que comprende una especie que se puede intercalar con una porción del electrodo del actuador. Con la intercalación, el electrodo puede sufrir un desplazamiento desde una primera orientación hasta una segunda orientación. En otras realizaciones, la especie se puede desintercalar desde una porción del electrodo en el cuerpo al exponerlo al fluido corporal. O en otras realizaciones, la especie puede oxidar o reducir una porción del electrodo al exponerlo al fluido corporal, lo que da como resultado el desplazamiento. En otros casos, el actuador se puede usar fuera del cuerpo, por ejemplo el actuador puede estar expuesto a un fluido corporal extraído de un cuerpo.

La FIG. 7 es un ejemplo ilustrativo de un actuador que se puede usar en un marco fisiológico. El actuador 290 incluye un electrodo positivo 292, un electrodo negativo 294, y un aislante 296 situado entre los dos electrodos. El actuador 290 puede estar inmerso en el fluido corporal 298 que comprende la especie 299, que se puede intercalar en o se puede desintercalar fuera de un electrodo en un grado mayor que el otro electrodo, por ejemplo con la aplicación de un voltaje o corriente. Esto puede provocar el desplazamiento del actuador desde una primera orientación hasta una segunda orientación. Se pueden lograr diferentes modos de desplazamiento del actuador, dependiendo del diseño mecánico del actuador. Por ejemplo, el actuador puede estar en forma de un haz, acordeón, endoprótesis, disco, o una estructura apilada multiestratificada. También se pueden usar otras formas y diseños de actuadores para inducir la expansión, contracción, plegamiento, retorcimiento, flexión, enrollamiento, etc., de la estructura desde una primera orientación hasta una segunda orientación. En algunas realizaciones, el actuador puede estar en forma de un implante médico o un componente de un implante, tal como una endoprótesis, un sensor, una prótesis, y similar.

En otra realización de la invención, un sistema actuador incluye al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo, un electrodo positivo, y una especie que se puede intercalar, desintercalar, alear con, oxidar, reducir, o galvanizar con una primera porción de la celda electroquímica en un grado diferente a una segunda porción de la celda electroquímica. Como resultado de una de las interacciones anteriores de la especie con la porción primera y/o segunda, las porciones primera y/o segunda pueden sufrir un cambio dimensional con la descarga, provocando el desplazamiento del actuador que realiza trabajo mecánico. En algunas realizaciones, la celda electroquímica se construye y se dispone para ser cargada en la fábrica, y descargada durante el uso. En algunas realizaciones, la celda electroquímica se construye y se dispone para ser cargada en la fábrica, y se descarga parcialmente tras el uso, o ya no se carga más después de la primera descarga. El sistema actuador se puede construir y disponer para que se descargue espontáneamente. En algunos casos, el actuador se puede descargar una o más veces en diferentes casos para provocar varias actuaciones. Con la descarga (por ejemplo, descarga parcial, descarga completa), el actuador se puede desechar. Tal configuración puede ser útil para dispositivos portátiles tales como ciertas bombas, sensores, implantes, y dispositivos médicos.

Una realización de la invención incluye una bomba de infusión para infundir un líquido en un cuerpo. La bomba de infusión incluye al menos una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo, un electrodo positivo, y una especie, en la que el electrodo negativo y/o positivo sufre un cambio dimensional con la carga y/o descarga, para provocar la infusión del fluido en el cuerpo. Como alternativa, la bomba de infusión puede no incluir una especie en la fabricación, sino que, con la exposición a una especie durante el uso, la bomba de infusión puede realizar la actuación e infundir un fluido. En algunas disposiciones, la bomba de infusión se construye y dispone para que se descargue espontáneamente. Tal dispositivo se autoalimenta energéticamente, queriendo decir que la celda electroquímica del dispositivo se fabrica en el estado cargado. El dispositivo puede incluir materiales de electrodos positivo y negativo, seleccionados de forma que la celda electroquímica se expande o se deforma al descargarse. Por ejemplo, se pueden usar materiales de bajo coste, tales como silicio y estaño, como materiales de expansión (por ejemplo, tanto como 300%) al ser litiados.

La velocidad de bombeo, incluyendo la magnitud de volumen dispensado y la duración de la dispensación, se puede determinar mediante la tasa de expansión o deformación de la celda, que a su vez se puede controlar mediante la velocidad de descarga de la celda electroquímica. El control de la descarga se puede llevar a cabo por diversos métodos, tales como variando la resistencia de un circuito

externo a través del cual se descarga la celda. Los controles externos pueden incluir, por ejemplo, un resistor, que incluye un metal delgado o alambre que también sirve como fusible. Esto se puede usar para permitir la autodescarga controlada de la celda electroquímica a través del resistor o circuito externo. En una realización particular, se implementa un resistor variable en el circuito externo, incluyendo un circuito del estado sólido, a fin de controlar la velocidad de descarga y la velocidad de bombeo. Variando la resistencia externa de la celda, se puede controlar la velocidad de descarga instantánea y la tasa de actuación.

En otra realización, se puede variar el ciclo de trabajo del dispositivo a fin de controlar la extensión o grado de desplazamiento o bombeo. En esta realización, el circuito externo a través del cual se descarga o se carga el dispositivo se puede conmutar repetidamente entre circuito abierto y cerrado, o "encendido y apagado". Esto es, el ciclo de trabajo se puede controlar abriendo y/o cerrando un circuito externo asociado con el dispositivo actuador. La frecuencia y duración de los pulsos de encendido/apagado pueden proporcionar el control de la velocidad de desplazamiento y desplazamiento total. Por ejemplo, si un dispositivo en condiciones de cortocircuito externo muestra una descarga completa en un tiempo t que da como resultado una tensión total ε , la conmutación entre condiciones del circuito abierto y cerrado de forma que el tiempo total empleado en el circuito cerrado es $t/10$ corresponde a un ciclo de trabajo de 10%, siendo la tensión neta $\varepsilon/10$. En realizaciones en las que la duración del pulso de circuito cerrado es constante, la tasa de deformación se puede controlar variando la frecuencia del pulso. La frecuencia del pulso y la duración también se pueden variar independientemente para adecuarse a las no linealidades inherentes en la curva de desplazamiento frente a tiempo de respuesta del dispositivo a fin de lograr un perfil deseado de desplazamiento frente al tiempo del actuador o bomba.

En otras realizaciones, la velocidad de descarga se puede diseñar en la celda (por ejemplo, se puede proporcionar mediante ingeniería una velocidad de autodescarga). En una realización particular, la impedancia interna de la celda se diseña usando métodos conocidos por los expertos en la técnica de dispositivos electroquímicos o baterías, a fin de producir una velocidad deseada de descarga. En condiciones de cortocircuito externo, o en aquellas condiciones en las que la resistencia entre los conductores externos de la celda es sustancialmente menor que la impedancia interna de la celda, la velocidad de descarga, y por lo tanto la tasa de actuación, está determinada principalmente por la impedancia interna de la celda. Por ejemplo, la celda se puede diseñar para una cierta velocidad máxima de descarga y menores velocidades introducidas usando los métodos de control descritos aquí, o se puede diseñar para que tenga una impedancia interna relativamente elevada, que proporcione una velocidad segura y baja de descarga incluso en condiciones accidentales de cortocircuito.

La tasa y/o cantidad de deformación del dispositivo (y la correspondiente velocidad y/o cantidad de bombeo de una bomba controlada por tal dispositivo) se puede construir en el dispositivo de manera que, por ejemplo, un dispositivo desechable de un solo uso bombee a una velocidad y tiempo y/o volumen predeterminados y establecidos. Como alternativa, o además, se puede construir un dispositivo con un control de manera que la velocidad y/o grado de descarga/bombeo se puedan variar durante el uso del dispositivo, o se puedan ajustar entre uno de varios ajustes diferentes antes del uso del dispositivo. En algunos casos, cuando se puede usar el dispositivo, se pueden variar múltiples tiempos, velocidades y/o cantidad de descarga/bombeo entre usos, durante usos, etc. Aquellos de pericia normal en la técnica son bastante capaces de diseñar, mediante circuitería digital o analógica, o una combinación, sistemas en un dispositivo para cualquiera de estas características.

A través de estos y/u otros medios, se puede variar ampliamente la velocidad de bombeo controlando la velocidad de descarga de la celda electroquímica. En algunas realizaciones, la velocidad de descarga se puede controlar de forma remota, por ejemplo sin cables a través de la transmisión de señales enviadas a un circuito de control que controla el ciclo de trabajo o resistencia de la carga externa. Si se desea, la bomba puede dispensar diferentes volúmenes de fluidos, por ejemplo mayores que 0,01 ml, mayores que 0,1 ml, mayores que 1 ml, mayores que 5 ml, mayores que 10 ml, o mayores que 50 ml.

Las aplicaciones de actuadores de la invención en forma de una bomba se pueden usar para aplicaciones que incluyen, pero no se limitan a, el suministro subcutáneo de fármacos o fluidos, métodos intravenosos, intratecales y otros métodos habituales de suministro de fármacos y fluidos al cuerpo, ambientadores o dispensadores de perfume, y dispositivos de suministro de fármaco implantables.

Por ejemplo, es bien sabido que cuando se sumerge una celda bimetálica en un electrolito, uno del par bimetálico es el ánodo, y no se oxida preferentemente, mientras que el otro se oxida preferentemente. Un ejemplo es la protección anódica de hierro y acero con cinc. En una realización ilustrativa, la FIG. 8A muestra una primera porción 302 y una segunda porción 304, estando formadas las porciones primera y segunda por materiales diferentes. La FIG. 8B muestra la misma estructura tras la inmersión en agua. La estructura incluye ahora una capa 306. Si la primera porción comprende Fe, la segunda porción

que comprende Zn, con la exposición al agua, forma la porción 306, que comprende Zn(OH)_2 . La reacción en la porción 302 es $2\text{H}^+ + 2\text{e} = \text{H}_2(\text{g})$, y la reacción en la porción 306 es $\text{Zn} + 2(\text{OH}^-) = \text{Zn(OH)}_2 + 2\text{e}$.

Como se muestra en las FIGS. 9A-B, el actuador 310 incluye una primera porción 312 y una segunda porción 314. Si la primera porción está formada por Fe y la segunda porción 314 está formada por Zn en capas delgadas, con la conversión de Zn en Zn(OH)_2 , la expansión volumétrica durante la formación de Zn(OH)_2 (por ejemplo, $\text{Zn} + 2(\text{OH}^-) = \text{Zn(OH)}_2 + 2\text{e}$) daría como resultado una actuación espontánea, provocando el desplazamiento en forma de flexión, como se muestra en la FIG. 9B. Esta actuación espontánea se puede aprovechar en actuadores de la invención para realizar trabajo mecánico.

Como se muestra en la FIG. 10A-B, si la primera porción 320 está formada por Zn y la segunda porción 322 está formada por Fe, con la conversión de Zn (por ejemplo, $\text{Zn} + 2(\text{OH}^-) = \text{Zn(OH)}_2 + 2\text{e}$), la estructura 318 se abrirá, como se muestra en la FIG. 10B. Este tipo de actuación sería útil para estructuras tales como una endoprótesis, un disco que se expande para aliviar un esfuerzo compresivo entre vértebras, u otras estructuras. Se pueden lograr tipos similares de actuación usando una especie que simplemente se hincha mediante absorción preferencial de unión o una especie molecular desde un fluido.

Aquellos de pericia normal en la técnica serán capaces de seleccionar otros pares bimetalicos que serían adecuados para uso en la invención.

En el cuerpo, es deseable evitar el desprendimiento significativo de gas. También es deseable tener materiales dúctiles aunque fuertes que sufran deformación plástica permanente, para ciertas aplicaciones. En algunas realizaciones, puede ser ventajoso usar un actuador que se descarga espontáneamente cuando un material positivo y negativo se cortocircuitan eléctricamente entre sí y se sumerge en un electrolito que contiene una especie que se puede intercalar, desintercalar, alear con, oxidar, reducir, o galvanizar con al menos una porción del actuador.

Las FIGS. 11A-B muestran una celda de ion litio (por ejemplo, comprendiendo una porción $\text{Li}_{0.5}\text{CoO}_2$, y comprendiendo otra porción $\text{Li}_x\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, en el que $x > 4$) ensamblada en el estado de carga, y que sufre descarga espontánea con la emergencia en un electrolito. (Como alternativa a una celda de ion litio, el actuador puede ser una celda de hidruro metálico de níquel (por ejemplo, comprendiendo una porción Ni^{3+}OOH , y comprendiendo la otra porción MH_x , en el que M es un metal), ensamblada en el estado de carga y que sufre descarga espontánea con la emergencia en un electrolito). La FIG. 11A muestra el actuador a tensión cero antes de la exposición a un electrolito, y la FIG. 11B muestra el actuador tras la exposición al electrolito. Con la descarga, una primera porción del actuador se expande hasta un volumen mayor que una segunda porción del actuador, provocando de ese modo la flexión (contracción) del actuador. De este modo, la descarga espontánea con la exposición del actuador a un electrolito puede provocar la actuación.

Las FIGS. 12A-B muestran una celda de ion litio o una celda de hidruro metálico de níquel ensamblada en el estado de carga (FIG. 12A) y que sufre una descarga espontánea (FIG. 12B) con la emergencia en un electrolito. La forma del actuador provoca que se expanda con la descarga espontánea.

En los actuadores de la invención se pueden usar varios tipos de materiales. Por ejemplo, se puede usar titanio metálico como material de electrodo cuando la especie es hidrógeno, puesto que el titanio metálico es un medio muy bueno de absorción del hidrógeno. Otros medios adecuados de absorción del hidrógeno incluyen metales nobles. Pt, Rh, Ir y Au son también metales dúctiles y fuertes que se pueden usar como materiales de electrodos. En una realización particular, se puede fabricar una endoprótesis que se abre de forma espontánea (u otro diseño de actuador) uniendo, por ejemplo, un metal hidratado a un metal no hidratado, de manera que, con la exposición a un electrolito, la transferencia de hidrógeno de uno a otro provoca el desplazamiento del actuador. Este enfoque específico también se puede beneficiar de la introducción de una barrera contra la difusión entre los dos metales, como se usa ampliamente en la tecnología de dispositivos semiconductores, para evitar la difusión de hidrógeno entre los dos metales provocando la actuación antes de la exposición al electrolito, como se muestra en las FIGS. 13-14. La FIG 13 muestra un sistema actuador que comprende dos porciones diferentes, comprendiendo cada una un material diferente (por ejemplo, metal), y opcionalmente una barrera contra la difusión situada entre cada porción, (a) antes de la exposición a un electrolito y (b) con la exposición a un electrolito, en el que el sistema sufre flexión o abarquillado. De forma similar, la FIG. 14 muestra un sistema actuador que comprende dos porciones diferentes, comprendiendo cada una un material diferente (por ejemplo, metal), y opcionalmente una barrera contra la difusión situada entre cada porción, (a) antes de la exposición a un electrolito y (b) con la exposición a un electrolito, en el que el sistema sufre flexión o abertura de la estructura. En algunas realizaciones, el iridio es atractivo como metal usado para formar al menos una porción del actuador, debido a su biocompatibilidad.

En otra realización, los actuadores de la invención pueden incluir estructuras abisagradas, por ejemplo como se muestra en las FIGS. 15A-B. El actuador puede incluir una primera porción 342 que puede preferentemente intercalar, desintercalar, alearse con, oxidar, reducir, o galvanizar una especie, y una segunda porción 344 que no intercala, desintercala, se alea con, oxida, reduce, o galvaniza preferentemente la especie. En algunos casos, la segunda porción 346 y la tercera porción 348 están formadas del mismo material. Con la exposición del actuador a una primera especie, la primera porción puede intercalar, desintercalar, alearse con, oxidar, reducir, o galvanizar una especie en un grado diferente de aquel de la segunda y/o tercera porción, provocando el desplazamiento (por ejemplo, expansión) del actuador, como se muestra en la FIG. 15B. Opcionalmente, la segunda porción 346 y la tercera porción 348 están formados de diferentes materiales, y, con la exposición a una segunda especie, el actuador se puede desplazar desde una primera orientación hasta una segunda orientación.

Los actuadores de la invención incluyen una primera porción y una segunda porción, que, con la carga y/o descarga, se intercala, desintercala, se alea con, se oxida, se reduce, o se galvaniza una especie con la primera porción en un grado diferente que con la segunda porción, experimentando la primera porción un cambio dimensional resultante con relación a la segunda porción, se pueden usar en una variedad de marcos. En consecuencia, los actuadores de la invención pueden tener configuraciones, formas, y/o diseños distintos de los descritos anteriormente. Los ejemplos de tales configuraciones, formas y/o diseños incluyen los descritos en las patentes U.S. n^{os} 6.545.384; 5.907.211; 5.954.079; 5.866.971; 5.671.905; y 5.747.915.

Ahora se describen las consideraciones para el diseño de actuadores electroquímicos de bajo voltaje, de larga vida. En algunas realizaciones, el diseño de un actuador electroquímico de bajo voltaje, de larga vida, incluye ciertos criterios de funcionamiento. En una realización, se proporciona un método para hacer funcionar una celda electroquímica que comprende un electrodo negativo, un electrodo positivo, un electrolito no acuoso, y litio como especie (por ejemplo, una especie de intercalación). La celda electroquímica se puede hacer funcionar de manera que el electrodo positivo tenga un potencial de equilibrio medio (o voltaje de circuito abierto (OCV)) con respecto al litio metálico a lo largo del estado de carga de su uso que sea menor que alrededor de +4V. El electrodo negativo puede tener un potencial medio con respecto a litio metálico a lo largo del estado de carga de su uso que sea mayor que alrededor de +0,2V. La celda electroquímica puede estar en relación de funcionamiento con un componente que se puede desplazar desde una primera orientación hasta una segunda orientación. El funcionamiento de la celda electroquímica puede provocar un cambio volumétrico o dimensional de la celda electroquímica. Al aplicar un voltaje menor que alrededor de 10V a la celda electroquímica, el componente se puede desplazar desde la primera orientación hasta la segunda orientación a partir del cambio volumétrico o dimensional de la celda electroquímica.

Como se describe con más detalle a continuación, un potencial demasiado elevado en el electrodo positivo puede dar como resultado corrosión electroquímica del colector de corriente y/o materiales activos en el electrodo positivo. En algunos casos, el potencial elevado también puede provocar degradación de los electrolitos no acuosos o sales, lo que puede dar como resultado la pérdida de conductividad del electrolito y/o efectos secundarios indeseables en la celda. Como tal, ciertas celdas electroquímicas de la invención se pueden hacer funcionar para que tengan un potencial de litio medio a lo largo del estado de carga de la celda menor que alrededor de +4V, menor que alrededor de 3,5V, menor que alrededor de +3,0V o menor que alrededor de 2,5V.

Como también se describe más abajo, un potencial de equilibrio medio demasiado bajo (por ejemplo, con respecto a litio metálico a lo largo del estado de carga de su uso) puede provocar efectos negativos tales como corrosión electroquímica del colector de corriente del electrodo negativo, o la deposición de litio metálico. En consecuencia, las celdas electroquímicas se pueden hacer funcionar de manera que el electrodo negativo tenga un potencial de equilibrio medio mayor que alrededor de +0,2V, mayor que alrededor de +0,5V, mayor que alrededor de +1,0V, o mayor que alrededor de +1,5V. Dependiendo de la celda electroquímica particular, se puede escoger un intervalo máximo y un intervalo mínimo de potencial de equilibrio medio de los electrodos positivo y negativo, respectivamente. Por ejemplo, en una realización, el electrodo positivo tiene un potencial de equilibrio medio menor que alrededor de +3,5V, y el electrodo negativo tiene un potencial de equilibrio medio mayor que alrededor de +0,5V. En otra realización, el electrodo positivo tiene un potencial de equilibrio medio menor que alrededor de +3,5V, y el electrodo negativo tiene un potencial de equilibrio medio mayor que alrededor de +1,0V. En todavía otra realización, el electrodo positivo tiene un potencial de equilibrio medio menor que alrededor de +3,5V, y el electrodo negativo tiene un potencial de equilibrio medio mayor que alrededor de +1,5V. En todavía otra realización, el electrodo positivo tiene un potencial de equilibrio medio menor que alrededor de +3,0V, y el electrodo negativo tiene un potencial de equilibrio medio mayor que alrededor de +0,5V. Por supuesto, se pueden escoger otros intervalos de potencial de equilibrio medio para los electrodos positivo y negativo.

En ciertas realizaciones, el funcionamiento de una celda electroquímica puede implicar aplicar un voltaje menor que alrededor de 10V a la celda electroquímica y, a partir del cambio volumétrico o dimensional de la celda electroquímica, desplazar el componente desde una primera orientación hasta una segunda orientación. Como se explica con mayor detalle más abajo, el voltaje aplicado (es decir, el voltaje de funcionamiento) es generalmente bajo, a fin de incrementar el ciclo de vida del actuador electroquímico. En consecuencia, el funcionamiento de una celda electroquímica puede incluir aplicar un voltaje menor que alrededor de 10V, menor que alrededor de 8V, menor que alrededor de 7,5V, menor que alrededor de 6V, menor que alrededor de 5V, o menor que alrededor de 4V. Sin embargo, se debería entender que, para ciertos períodos que requieren una actuación de energía elevada a lo largo de tiempos cortos, los voltajes aplicados pueden ser mayores que el voltaje de estado estacionario aplicado. En consecuencia, más del 95% de la vida de funcionamiento de una celda electroquímica se puede hacer funcionar con un voltaje aplicado menor que alrededor de 10V, menor que alrededor de 8V, menor que alrededor de 7,5V, menor que alrededor de 6V, menor que alrededor de 5V, o menor que alrededor de 4V. En otros casos, más del 90%, más del 80%, más del 70%, más del 60%, o más del 50% de la vida de funcionamiento de la celda electroquímica se puede hacer funcionar a tales voltajes.

Las siguientes consideraciones para el diseño de actuadores electroquímicos de bajo voltaje, de larga vida, se describen específicamente para el diseño de celdas electroquímicas de litio con electrolito no acuoso. Sin embargo, se debería entender que los principios también se pueden aplicar a cualquier celda electroquímica usada como actuador.

Para la fuerza motriz para el transporte de una especie, incluyendo una especie iónica, en una celda electroquímica usada como actuador puede ser el sobrepotencial (durante la carga) o el subpotencial (durante la descarga), siendo el sobrepotencial y el subpotencial, respectivamente, la magnitud del voltaje aplicado sobre y por debajo del voltaje de equilibrio o de reposo o de circuito abierto (OCV) de la celda en un estado particular de carga. El OCV como función del estado de carga se puede determinar fácilmente por aquellos de pericia normal en la técnica si se conoce en potencial frente a x (concentración) de cada compuesto, y si se conocen los parámetros de la celda tales como la relación de material catódico a anódico y el grado de pérdida irreversible de la especie iónica durante el ciclo. Por ejemplo, las celdas de LiCoO_2 -grafito pueden tener un OCV que varía continuamente con el estado de carga entre alrededor de 3,9V y alrededor de 3V, mientras que las celdas de LiFePO_4 -grafito tienen un voltaje casi constante de alrededor de 3,3V a lo largo de un amplio estado de carga.

Para una tasa elevada de actuación, puede ser deseable tener un gran sobrepotencial durante la carga, y un gran subpotencial durante la descarga. Por otro lado, también se reconoce aquí que el intervalo de potenciales aplicados a una celda electroquímica puede influir en el comportamiento y vida de la celda, especialmente durante muchos ciclos de carga/descarga, por varias razones. En el extremo alto del intervalo de voltaje de funcionamiento, se reconoce que un potencial demasiado elevado puede provocar corrosión electroquímica del colector de corriente (tal como aluminio) o materiales activos en el electrodo positivo, o la degradación de electrolitos no acuosos o sales. Esto puede dar como resultado la pérdida de conductividad del electrolito o efectos secundarios indeseables tales como la formación de gas dentro de la celda. En el extremo bajo del voltaje de funcionamiento, un potencial demasiado bajo puede provocar corrosión electroquímica del colector de corriente del electrodo negativo (tal como cobre) o la deposición de litio metálico, ocurriendo esto último si el potencial en el electrodo negativo alcanza aquel en el que el litio metálico es estable. De este modo, para una tasa elevada de actuación, así como para la estabilidad y larga vida en una celda electroquímica de litio no acuosa usada para la actuación, puede ser deseable tener un OCV relativamente bajo, de manera que se puede aplicar un sobrepotencial elevado durante la carga sin alcanzar los límites de estabilidad del sistema electrolítico o del colector de corriente positiva. Sin embargo, el OCV bajo no debería ser demasiado bajo; de otro modo, un subpotencial elevado, aplicado durante la descarga, puede alcanzar potenciales a los cuales los colectores de corriente anódica (tales como cobre) se disuelven, o esto puede provocar que el litio metálico se galvanice. La selección de materiales activos para los electrodos positivo y negativo que satisfacen estos criterios es importante, puesto que puede ser deseable proporcionar una elevada energía y potencia de actuación en celdas electroquímicas de la invención.

En algunas realizaciones, es deseable tener un material de electrodo positivo con tanto una tasa elevada como una tensión elevada, y un OCV medido con respecto a litio metálico que es menor que alrededor de 4V. En otras realizaciones, el OCV medido con respecto a litio es menor que alrededor de 3,5V, menor que alrededor de 3V, o menor que alrededor de 2,5V. Los ejemplos no limitantes de tales materiales de electrodo positivo incluyen compuestos para electrodos basados en LiFePO_4 , TiS_2 , TaS_2 , y sus aleaciones y formas composicionalmente modificadas. En algunos casos, las celdas electroquímicas incluyen materiales de electrodo negativo con una potencia elevada así como un OCV a lo largo del intervalo de composición usada que es al menos +0,1V con respecto a litio metálico. En otros casos, el OCV es al menos +0,5V o más. Por ejemplo, el grafito puede ser un material adecuado cuando se usa con un

material de electrodo positivo de manera que la tensión neta es sustancial. Otro material adecuado incluye la espinela de Li_xTiO_2 , por ejemplo la composición de partida $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, que, con la litación, tiene un potencial casi constante de alrededor de 1,57V con respecto a litio metálico a lo largo de un amplio intervalo de composiciones de litio, y un cambio de volumen casi nulo. En consecuencia, esto puede permitir que el cambio de volumen en el electrodo positivo se use para la actuación. En algunas realizaciones, las celdas electroquímicas basadas en tales combinaciones de materiales de electrodos positivo y negativo tienen OCV de la celda típicamente menores que alrededor de 3,5V. Por supuesto, es posible tener un voltaje de la celda que varíe entre valores positivos y negativos a medida que la celda se carga o se descarga, a la vez que se mantiene durante las condiciones descritas anteriormente de un potencial de electrodo positivo que no es demasiado elevado y un potencial de electrodo negativo que no es demasiado bajo con respecto al litio metálico.

Cuando se usa tal celda para la actuación electroquímica, el sobrepotencial y subpotencial aplicados pueden dar como resultado un voltaje de carga que está por encima, y un voltaje de descarga que está por debajo, del OCV de la celda. Sin embargo, generalmente, el valor absoluto del voltaje de funcionamiento de la celda sigue siendo bajo. Por ejemplo, el valor absoluto del voltaje de funcionamiento puede ser menor que alrededor de 10V, menor que 7,5V, menor que 5V, o menor que alrededor de 3,5V. Se debería observar que para una actuación de potencia elevada durante un tiempo corto, los voltajes aplicados pueden ser de naturaleza pulsada y pueden ser de forma segura significativamente mayores que el voltaje del estado estacionario que normalmente daría como resultado daño electroquímico a tales celdas. Sin embargo, para el funcionamiento de celdas electroquímicas en las condiciones en las que se mantiene el voltaje de la celda, para obtener una larga vida, el voltaje aplicado puede dar como resultado un potencial en el electrodo positivo que es menor que alrededor de 5V, menor que alrededor de 4,5V, o menor que 4V, con respecto al litio metálico. Esto se puede permitir mediante el uso de materiales de electrodo positivo basados en compuestos tales como LiFePO_4 , LiTiS_2 , y LiTaS_2 .

Ahora se describen los criterios de selección para compuestos con elevada densidad de energía mecánica, y actuación electroquímica de potencia elevada. La densidad teórica de energía mecánica de los compuestos de actuación está dada por la ecuación $\frac{1}{2} E \epsilon^2$, en la que E es el módulo elástico, y ϵ es la tensión que se puede inducir en las condiciones de funcionamiento particulares. De este modo, los materiales de tensión elevada y módulo elástico elevado tienen el potencial para proporcionar mayor densidad de energía en celdas electroquímicas de la invención.

Con respecto a actuadores electroquímicos, se reconoce aquí que la tensión obtenida no es necesariamente lineal con la concentración de la especie intercalante o formadora de aleación en la celda electroquímica. Por ejemplo, en una gráfica de la tensión frente a la concentración x de Li del compuesto de intercalación Li_xTiS_2 , la pendiente de la curva aumenta abruptamente a concentraciones bajas de Li, como se describe en la Solicitud de Patente U.S. Serie nº 11/796.138, incorporada aquí como referencia. En consecuencia, es deseable, cuando se usa Li_xTiS_2 como un compuesto de actuación electroquímica, funcionar a lo largo de un intervalo de x de alrededor de 0 a 0,4 si es deseable obtener la máxima energía mecánica para una energía eléctrica dada usada para hacer funcionar el actuador, y/o para obtener la potencia mecánica más elevada del actuador. Esto último se concluye a partir de la consideración de que la cantidad de especie intercalada x es el producto de la corriente eléctrica y tiempo, de forma que, para una corriente de funcionamiento particular, se obtiene una actuación más rápida para compuestos con una mayor tensión para un valor dado de x .

También se reconoce que la potencia mecánica de los actuadores electroquímicos puede depender de la capacidad de velocidad (por ejemplo, velocidad de carga o descarga) de la celda electroquímica. Se puede obtener una capacidad de velocidad elevada seleccionando electrolitos de conductividad iónica elevada, y/o diseñando celdas de forma que las longitudes de difusión iónica o electrónica sean cortas. Para un electrodo a base de partículas, por ejemplo, puede ser deseable un tamaño fino de partículas, a fin de disminuir la longitud de difusión y , en consecuencia, el tiempo de difusión.

Por lo tanto, las propiedades de transporte de los materiales pueden ser también un criterio de selección importante para diseñar actuadores electroquímicos. Por ejemplo, el coeficiente de difusión química de la especie iónica responsable del cambio de volumen se puede seleccionar para que sea elevado. Una realización de la invención identifica un "factor de potencia" que se puede usar como un factor de mérito para comparar diferentes materiales, dando por la ecuación $\frac{1}{2} E \epsilon^2 D$, en la que D es el coeficiente de difusión química de la especie iónica en el material de interés. La FIG. 4 compara el factor de potencia de diferentes materiales frente a su densidad específica. Se señala que los materiales de elevado factor de potencia y baja densidad específica ρ pueden, siendo todo lo demás igual, proporcionar mayor potencia específica como un actuador electroquímico. Por ejemplo, los dicalcogenuros estratificados tales como TiS_2 y TaS_2 pueden ser compuestos de actuación electroquímica particularmente útiles según estos criterios.

Se ha reconocido que los factores de mérito de interés en el campo de actuación también incluyen la densidad de potencia, que es la potencia mecánica disponible por unidad de volumen, y la potencia específica, que es la potencia mecánica disponible por unidad de masa. Es deseable maximizar los valores de ambos en la mayoría de las aplicaciones de actuación. Se debería observar que la densidad de potencia de los actuadores electroquímicos requiere consideración de la longitud de difusión característica que las especies iónicas son transportadas durante el funcionamiento del actuador electroquímico. Mientras que la longitud de transporte incluye la longitud entre electrodos, a través de la porosidad del electrodo, y a través del separador, la tasa de actuación no excede el tiempo necesario para el transporte difusional en el propio material. De este modo, tanto el tamaño de partículas (para un actuador a base de partículas) como el coeficiente de difusión química son factores importantes. Para comparar materiales sobre la misma base, suponiendo que los materiales se pueden procesar para que tengan tamaños de partículas similares, la densidad de potencia se puede definir como la cantidad $\frac{1}{2}(E_e^2 D_{Li}/x^2)$, y la potencia específica como $\frac{1}{2}(E_e^2 x^2 \rho / D_{Li})$, en las que x es la dimensión de la partícula (por ejemplo, radio o diámetro). La FIG. 4 compara la densidad de potencia de diferentes materiales frente a su densidad específica, y la FIG. 6 compara la densidad de potencia frente a la potencia específica de diferentes materiales. A partir de este criterio de selección, se pueden escoger materiales adecuados para actuadores electroquímicos. Por ejemplo, los dicalcogenuros estratificados tales como TiS_2 y TaS_2 pueden ser compuestos de actuación electroquímica particularmente útiles.

En una realización, los actuadores electroquímicos de la invención utilizan al menos dos (por ejemplo, un primer y un segundo) actuadores electroquímicos que trabajan concertadamente de forma que a medida que uno se carga (por ejemplo, a fin de producir trabajo mecánico útil), el otro se descarga, o viceversa. Por ejemplo, un sistema o dispositivo puede comprender una primera y una segunda celda electroquímica configuradas en una disposición antagónica con relación entre sí, de manera que la descarga de la primera celda da como resultado la carga de la segunda celda, y la descarga de la segunda celda da como resultado la carga de la primera celda. El artículo también puede incluir un componente construido y dispuesto para ser desplazado desde una primera orientación hasta una segunda orientación mediante carga y/o descarga de al menos una de las celdas primera y segunda electroquímicas. Por supuesto, una estructura que incluye celdas electroquímicas que están configuradas en una disposición antagonista con relación entre sí puede incluir una pluralidad de tales conjuntos de celdas electroquímicas, por ejemplo más de 2, más de 5, más de 10, más de 20 o más de 50 pares de celdas electroquímicas que están configuradas en una disposición antagónica. Tales celdas se pueden hacer funcionar en serie o en paralelo con relación entre sí. Aunque se han usado previamente pares de actuadores opuestos en estructuras activas (por la razón de que la mayoría de los actuadores trabajan mejor en tensión que en compresión, o viceversa), existen beneficios adicionales de tales diseños para uso en los actuadores electroquímicos de la invención. Los actuadores electroquímicos almacenan o liberan energía eléctrica al mismo tiempo de que realizan trabajo mecánico, y si tal energía eléctrica se disipa (por ejemplo, en forma de calor disipando la energía eléctrica a través de un resistor), el consumo de energía del actuador o sistema de actuadores puede ser elevado. Sin embargo, trasladando la energía eléctrica entre actuadores de forma que a medida que uno se carga el otro se descarga, la energía eléctrica se conserva en gran medida. Otro beneficio de los actuadores electroquímicos antagónicos, situados de manera que cada uno puede ejercer una fuerza sobre el otro, es que el esfuerzo ejercido sobre los actuadores se puede controlar cargando o descargando uno o ambos de los actuadores opuestos. Por ejemplo, esta disposición puede permitir que se controle el preesfuerzo sobre los actuadores para optimizar la fuerza de actuación, la fluencia, y/o el cumplimiento del actuador. Aún otro beneficio es que se mejora la exactitud de la colocación del actuador cuando actuadores opuestos se pueden cargar o descargar independientemente.

Las celdas electroquímicas típicas incluyen un electrodo (por ejemplo, un ánodo) que se expande, mientras que el otro (por ejemplo, el cátodo) se contrae durante la carga, o viceversa durante la descarga, a fin de reducir la cantidad de cambio de volumen en la celda. Esto puede ser ventajoso para ciertas aplicaciones, puesto que un cambio bajo de volumen puede reducir, por ejemplo, la deslaminación de ciertas capas en la celda. Sin embargo, en algunas realizaciones de la invención, es ventajoso que ambos electrodos se expandan durante la carga o descarga, o que un electrodo no se contraiga mientras que el otro se expande. Ventajosamente, tales configuraciones permiten que se use la máxima energía para la actuación, en lugar de gastarla en contrarrestar al otro electrodo.

En consecuencia, otra realización incluye una celda electroquímica que comprende un ánodo y un cátodo que se construyen y disponen de manera que durante un ciclo en el que uno de los electrodos se expande al menos 1% en volumen, el otro electrodo no se contrae sustancialmente. En otras realizaciones, uno de los electrodos se expande al menos 0,5% en volumen, al menos 2% en volumen, o al menos 4% en volumen, mientras que el otro electrodo no se contrae sustancialmente. Por ejemplo, a medida que uno del ánodo o cátodo se expande, el otro se puede expandir, o puede no cambiar de volumen. Un componente puede estar en relación operativa con tal celda electroquímica, y el componente se puede desplazar desde una primera orientación hasta una segunda orientación mediante carga y/o des-

carga de la celda electroquímica. Esta expansión simultánea del ánodo y cátodo, o la expansión de un electrodo mientras que el otro no se contrae, se puede realizar usando materiales apropiados para el ánodo y cátodo.

5 En algunos casos, un electrodo puede descargar espontáneamente una especie (por ejemplo, litio), provocando una expansión o contracción del electrodo y/o movimiento de uno o más componentes del dispositivo desde una primera orientación hasta una segunda orientación. Los materiales de electrodo que muestran descarga espontánea son conocidos en la técnica y pueden ser ventajosos en casos en los que se desea un estado de "suspensión" particular del dispositivo, por ejemplo en el caso de un cortocircuito intencionado o accidental de la celda electroquímica.

10 Los materiales adecuados para uso como electrodos incluyen materiales electroactivos, tales como metales, óxidos metálicos, sulfuros metálicos, nitruros metálicos, aleaciones metálicas, compuestos intermetálicos, otros compuestos que contienen metales, otros materiales inorgánicos (por ejemplo, carbono), y similares. En algunos casos, los electrodos pueden comprender ventajosamente materiales que tienen un módulo elástico elevado. En algunos casos, el material puede ser capaz de sufrir un cambio de volumen u otras dimensiones con la interacción con una especie, como se describe aquí. En algunas realizaciones, los electrodos pueden comprender un material que comprende una estructura cristalina, tal como un cristal único o un policristal. En algunas realizaciones, los electrodos pueden comprender un material amorfo o desordenado.

20 En algunos casos, el material que forma el ánodo comprende uno o más de aluminio, plata, oro, boro, bismuto, galio, germanio, indio, plomo, antimonio, silicio, estaño. En algunas realizaciones, el material que forma el ánodo puede comprender $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ o una aleación o composición dopada del mismo. Los ejemplos de materiales que pueden formar el cátodo incluyen LiCoO_2 , LiFePO_4 , LiNiO_2 , LiMnO_2 , LiMn_2O_4 , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, TiSi_2 , MoSi_2 , WSi_2 , TiS_2 , o TaS_2 , o cualquier aleación o composición dopada de los mismos. En algunos casos, el material que forma el cátodo puede comprender TiS_2 o TaS_2 . En otras realizaciones, el material que forma el cátodo puede comprender LiMPO_4 , en el que M es uno o más metales de transición de la primera fila (por ejemplo, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, o Zn), o cualquier aleación o composición dopada de los mismos. En algunos casos, el cátodo comprende carbono, en el que el carbono puede estar en forma de grafito, una estructura de fibra de vidrio, una estructura de carbono vítreo, un grafito pirolítico muy orientado, una estructura de carbono desordenada, o una combinación de los mismos. Una celda electroquímica que comprende tales composiciones de materiales se puede hacer funcionar a un potencial catódico descrito anteriormente, por ejemplo menor que +4V con respecto al potencial de litio metálico. El potencial anódico se puede seleccionar de los potenciales descritos anteriormente, por ejemplo mayor que +0,5V con respecto al potencial de litio metálico.

35 En algunos casos, el material que forma el electrodo puede comprender especies dispersas en el material. Por ejemplo, los electrodos pueden comprender una cantidad de una especie de manera que el electrodo puede servir como fuente de la especie dentro del dispositivo. En algunas realizaciones, un sustrato u otro material de soporte puede interactuar con una especie para inducir un cambio volumétrico o dimensional. Por ejemplo, una oblea de silicio, u otro metal o sustrato que contiene metal se puede litiar de manera que se produce un cambio volumétrico o dimensional con la carga/descarga de la celda electroquímica.

40 Los materiales para uso en electrodos de la invención se pueden seleccionar para que muestren ciertas propiedades con la interacción con una especie (por ejemplo, litiación y deslitiación). Por ejemplo, los materiales se pueden seleccionar para que muestren un cierto tipo o cantidad de cambio volumétrico o dimensional (por ejemplo, actuación) cuando se usan en una celda electroquímica como se describe aquí. Aquellos de pericia normal serán capaces de seleccionar tales materiales usando ensayos de selección simples. En algunos casos, las propiedades y/o comportamiento de un material pueden ser conocidos, y una persona de pericia normal en la técnica sería capaz de seleccionar materiales para adecuarse a una aplicación particular basándose, por ejemplo, en la cantidad de cambio volumétrico deseado. Por ejemplo, se sabe que la intercalación reversible de litio con fosfoolivinas $\text{Li}(\text{Fe},\text{Mn})\text{PO}_4$ produce cambios de volumen de 7,4-10%, basado en la relación de Fe/Mn, como se describe en A. Yamada et al., J. Electrochem. Soc., 148, A224 (2001). En algunos casos, los materiales se pueden identificar incorporando un material como un electrodo dentro de una celda electroquímica y observando el comportamiento del material con la carga y descarga de la celda.

55 En algunos casos, los materiales de electrodo se pueden seleccionar basándose en la estabilidad de un material que interacciona con la especie. Por ejemplo, cuando el litio es la especie, se puede seleccionar un material basándose en su capacidad para aceptar rápida y/o reversiblemente iones litio (por ejemplo, para ser litiado) y/o donar iones litios (por ejemplo, para ser deslitiado) con la carga/descarga. También, la tensión correspondiente asociada con la interacción reversible de la especie con el material se puede determinar conociendo la velocidad de transporte iónico en el material. Tales

determinaciones se pueden evaluar experimentalmente o se pueden hacer teóricamente usando valores tabulados o estimados de propiedades tales como los coeficientes de difusión iónica, las conductividades iónica y electrónica, y los coeficientes de velocidad de reacción superficial. Aquellos de pericia normal en la técnica serán capaces de usar esta información para seleccionar materiales apropiados para uso como electrodos.

Los electrodos se pueden fabricar por métodos conocidos en la técnica. En una realización, los materiales de electrodo se pueden moldear a partir de suspensiones a base de polvo que contienen un aglutinante polimérico y/o un aditivo conductor tal como carbono. La suspensión se puede calandrar (por ejemplo, laminar) a alta presión (por ejemplo, varias toneladas por pulgada lineal) para formar capas densamente compactas que tienen un porcentaje deseado de volumen de material activo.

Los materiales adecuados para uso como un electrolito incluyen materiales capaces de funcionar como un medio para el almacenamiento y transporte de iones, y, en algunos casos, como un separador entre el ánodo y el cátodo. Se puede usar cualquier material líquido, sólido, o gel capaz de almacenar y transportar iones, en tanto que el material sea electroquímica y químicamente no reactivo con respecto al ánodo y al cátodo, y el material facilite el transporte de iones (por ejemplo, iones litio) entre el ánodo y el cátodo. El electrolito puede ser electrónicamente no conductor para evitar el cortocircuito entre el ánodo y el cátodo.

El electrolito puede comprender una o más sales electrolíticas iónicas para proporcionar conductividad iónica, y uno o más disolventes electrolitos líquidos, materiales poliméricos en gel, o materiales poliméricos. En algunos casos, el electrolito puede ser un electrolito no acuoso. Los electrolitos no acuosos adecuados pueden incluir electrolitos orgánicos que incluyen electrolitos líquidos, electrolitos en gel, y electrolitos sólidos. Los ejemplos de electrolitos no acuosos están descritos, por ejemplo, por Dominey en Lithium Batteries, New Materials, Developments and Perspectives, Capítulo 4, p. 137-165, Elsevier, Amsterdam (1994), y Alamgir et al. en Lithium Batteries, New Materials, Developments and Perspectives, Capítulo 3, p. 93-136, Elsevier, Amsterdam (1994). Los ejemplos de disolventes electrolíticos líquidos no acuosos incluyen, pero no se limitan a, disolventes orgánicos no acuosos, tales como, por ejemplo, N-metilacetamida, acetonitrilo, acetales, cetales, ésteres, carbonatos, sulfonas, sulfitos, sulfolanos, éteres alifáticos, éteres cíclicos, glimas, poliéteres, ésteres de fosfato, siloxanos, dioxolanos, N-alquilpirrolidonas, derivados sustituidos de los mismos (por ejemplo, derivados halogenados de los mismos), y combinaciones de los mismos.

En algunas realizaciones, las celdas electroquímicas pueden comprender además un material barrera o separador (por ejemplo, capa) situado dentro del sistema o dispositivo, por ejemplo entre el cátodo y el ánodo. El separador puede ser un material que separa o aísla el ánodo y el cátodo entre sí, evitando el cortocircuito, y que permite el transporte de iones entre el ánodo y el cátodo. Los materiales adecuados para uso como materiales separadores incluyen materiales que tienen un módulo elástico elevado y/o una rigidez (por ejemplo, rigidez) elevada, materiales que son electrónicamente aislantes, y/o materiales que tienen resistencia mecánica suficiente para soportar elevada presión, peso, y/o tensión (por ejemplo, carga) sin pérdida de función. En algunos casos, la capa separadora puede ser porosa. Los ejemplos de materiales separadores incluyen vidrio, cerámica, una cerámica de silicato, cordierita, óxido de aluminio, aluminosilicatos, u otros óxidos o nitruros o carburos de metales mixtos que son electrónicamente aislantes. En algunos casos, la capa separadora puede comprender un material polimérico. Las capas separadoras que comprenden, por ejemplo, materiales elastoméricos pueden ser útiles para permitir movimientos de cizallamiento entre uno o más componentes.

En una realización, el material separador poroso se puede moldear como un particulado o capa en suspensión sobre las superficies de uno o ambos electrodos antes del ensamblaje de las capas, usando métodos conocidos por aquellos de pericia normal en la técnica para el procesamiento de materiales cerámicos o tecnología de revestimiento, tal como deposición por pulverización, revestimiento con rasqueta, impresión serigráfica, revestimiento de banda, revestimiento inverso con barra de coma, o revestimiento con boquilla de ranura ancha.

Los dispositivos de la invención pueden comprender además componentes adicionales para adecuarse a una aplicación particular. Por ejemplo, los dispositivos de la invención pueden comprender un suministro de polvo, un colector de corriente, tal como un colector de corriente que comprende un material conductor, capas de empaquetamiento externas, capas separadoras, y similares. La capa de empaquetamiento puede comprender un material electroquímicamente aislante u otro material protector.

El sistema o dispositivos se pueden pretratar o procesar opcionalmente antes de usarlos como un actuador. El pretratamiento de los dispositivos puede potenciar el comportamiento mecánico, la rigidez, la densidad de energía de actuación, la tensión de actuación, la reversibilidad, y/o el tiempo de vida de los dispositivos, y/o puede reducir la deformación por fluencia y la histéresis de tensión. En algunos casos,

los dispositivos, o uno o más de sus componentes, se pueden someter a presión hidrostática y/o esfuerzo uniaxial para consolidar los materiales y/o componentes del dispositivo, y/o reducir la cantidad de volumen libre. En algunas realizaciones, la presión aplicada puede ser 68,9 N/mm² (10.000 psi), 137,9 N/mm² (20.000 psi), 206,8 N/mm² (30.000 psi), 310,3 N/mm² (45.000 psi), o mayor. Se debería entender que se puede usar cualquier cantidad de presión aplicada para pretratar un dispositivo, de manera que se evite el fallo interno del dispositivo y/o se pueda lograr la mejora del comportamiento del dispositivo.

Los siguientes ejemplos pretenden ilustrar ciertas realizaciones de la presente invención, pero no se deben de interpretar como limitantes y no ejemplifican el alcance completo de la invención.

EJEMPLO 1

1.0 Bomba electroquímica autoalimentada energéticamente

En este ejemplo predictivo, los actuadores de la invención se pueden usar como bombas electroquímicas autoalimentadas para la terapia de insulina.

El tratamiento clínico de diabéticos de tipo 1 se hace habitualmente mediante terapia con insulina, en la que se usa en combinación inyecciones de insulina de actuación prolongada y corta para responder a medidas periódicas de glucemia. El tratamiento puede incluir una terapia con una bomba de infusión de insulina, incluyendo la infusión de insulina subcutánea continua (CSII), que dispensa insulina de actuación rápida desde una bomba controlada por un microprocesador a través de un catéter minúsculo. Algunas bombas existentes pueden dispensar continuamente insulina de actuación rápida y pueden proporcionar dosis en incrementos antes o después de las comidas. El conjunto de infusión se cambia cada tres días, de forma que se reduce drásticamente el número efectivo de inyecciones a lo largo del régimen de múltiples inyecciones diarias (MDI) convencional. El uso exclusivo de insulina de actuación rápida produce una capacidad de predicción muy mejorada en la dosificación puesto que las formas de insulina que actúan prolongadamente trabajan formando un depósito bajo la piel. Sin embargo, la velocidad de liberación de la insulina desde tales depósitos puede variar significativamente dependiendo de factores tales como la actividad física. Las bombas electroquímicas autoalimentadas pueden resolver los problemas de número efectivo reducido de inyecciones y velocidades de liberación de insulina variables.

Una bomba electroquímica autoalimentada se puede diseñar para suministrar una carga útil de 2,0 ml durante un período de 72 horas. La FIG. 16 muestra un diseño esquemático para la bomba electroquímica autoalimentada 350. El electrodo negativo 355 proporciona una fuente de litio, mientras que el electrodo positivo 360 es el elemento que se expande. La celda está electroquímicamente balanceada de manera que el litio disponible en el electrodo negativo puede expandir el electrodo positivo. La bomba se puede diseñar para una expansión de volumen de 300% del electrodo positivo, creando un desplazamiento longitudinal, no diferente de un pistón, que suministra fuerza a una plancha de actuación que a su vez aplica presión a un depósito 365 que contiene la disolución de insulina. El desplazamiento vertical del electrodo positivo se puede determinar por su relación de aspecto de anchura/altura (que se supone aquí que es 2:1) y el cambio de volumen. El electrolito puede ser un electrolito de batería de litio no acuoso estándar. El empaquetamiento puede ser un empaquetamiento polimérico similar al usado actualmente para baterías de ion litio recargables.

Ventajosamente, la velocidad de liberación de la disolución de insulina se puede controlar eligiendo materiales apropiados usados para formar el electrodo positivo. Por ejemplo, para una bomba electroquímica que tiene un material de electrodo positivo de rigidez relativamente baja, el electrodo positivo se puede desplazar lentamente a su nueva posición de equilibrio con la descarga. Esto puede dar como resultado una aplicación lenta de una fuerza al depósito, provocando de ese modo la infusión lenta de insulina al cuerpo.

La bomba puede tener un volumen de 8,6 ml, lo que permitirá un volumen total del dispositivo de <15 ml. La masa de la bomba de 14,5 g debería permitir una masa total del dispositivo de alrededor de 20 g. Con la elección apropiada de materiales y electrolito, este diseño de bomba puede suministrar insulina durante 72 h a la velocidad basal requerida. Para la velocidad de bolo, que corresponde a una velocidad de descarga de la celda de aproximadamente C/5 (es decir, 5 h de descarga para toda la capacidad de la celda), se pueden incorporar modificaciones adicionales de diseño. Adicionalmente y/o como alternativa, la bomba puede tener especificaciones similares como aquellas para las bombas de infusión continua existentes. Por ejemplo, la insulina de actuación rápida, tal como el producto de Lilly Lispro®, viene envasado como disoluciones con concentración de 100 unidades por ml. Los niveles de insulina basales típicos se pueden ajustar entre 0,5 a 1,5 unidades por hora. Una dosis de bolo para una comida puede consistir en 1 unidad por 10 g de hidrato de carbono consumido, de manera que se puede desear tanto como 10 unidades para una comida. La farmacodinámica de la insulina de actuación rápida sugiere que la dosis se suministre durante 15 minutos. Cualquier cantidad mayor y se pueden observar algunas diferen-

cias de una inyección subcutánea de la misma cantidad. De este modo, la tasa pico de suministro es un volumen de 0,1 ml en 15 minutos. Una compresión lineal de un depósito con una sección transversal de 6,5 cm² requiere una velocidad de desplazamiento máxima de 0,015 cm en 15 minutos o 0,167 micrómetros por segundo. La carga útil diaria total de disolución de insulina debe ser aproximadamente 50 unidades o 0,5 ml. De este modo, un suministro de tres días requiere una carga útil de 1,5 ml en volumen.

EJEMPLO 2

Actuador electroquímico

En este ejemplo predictivo, un actuador electroquímico comprende una estructura bimórfica que incluye una capa de material de almacenamiento de litio dimensionalmente activo unida a una capa de cobre. La capa de cobre no se alea o intercala sustancialmente con litio, aunque es electroquímicamente estable a los potenciales de funcionamiento de la celda electroquímica. Esta estructura bimórfica forma el electrodo positivo de la celda. La capa de cobre también puede actuar como un colector de corriente de electrodo positivo, y se puede extender fuera de la celda cerrada herméticamente final para formar una lengüeta o conductor de corriente, o puede estar unido a una lengüeta o conductor de corriente que se extiende fuera de la celda. El electrodo negativo es una capa de litio metálico unida a o depositada sobre una capa de cobre que sirve como el colector de corriente negativa. Entre los dos electrodos se coloca una película separadora porosa, por ejemplo una tela de fibra de vidrio o un separador de polímero poroso tal como los usados en la construcción de baterías de ion litio. La celda estratificada se infunde con un electrolito líquido conductor de litio no acuoso, tal como se usa habitualmente en la tecnología de baterías primarias o recargables de litio, o capacitores de doble capa eléctricos no acuosos. Los ejemplos incluyen un disolvente que comprende una mezcla 1:1 en volumen de carbonato de etileno y carbonato de dietileno, a la que se ha añadido una concentración 1M de LiPF₆ como sal conductora de litio, o acetonitrilo como disolvente al que se le ha añadido la misma sal LiPF₆.

El actuador electroquímico se cierra herméticamente en un empaquetamiento polimérico. Al montar la celda, la celda está en un estado cargado, teniendo el electrodo positivo de estaño un potencial químico para litio menor que el electrodo negativo de litio metálico. Al conectar los colectores de corriente negativa y positiva de forma que fluye corriente eléctrica entre los dos electrodos, se produce un flujo de corriente de iones litio internamente desde el litio al estaño. La aleación del estaño con litio da como resultado una expansión de volumen que puede alcanzar casi 300% cuando el estaño se satura con litio. A medida que la capa de estaño aumenta en volumen debido a la aleación con litio, la capa de cobre a la que está unida proporciona una restricción mecánica, y el bimorfo sufre desplazamiento (por ejemplo, flexión). En el electrodo negativo, la pérdida de litio puede dar como resultado igualmente un pequeño esfuerzo, pero este esfuerzo es mucho menor que el del electrodo positivo, puesto que el litio es muy dúctil cerca de la temperatura ambiente. De este modo, toda la celda sufre flexura debido al cambio de volumen de la capa de estaño en el actuador electroquímico que comprende el electrodo positivo. La flexura de la celda aplica a su vez una presión a un depósito de fármaco, que está situado adyacente al actuador. El depósito de fármaco contiene un fluido que comprende un fármaco y está encerrado por una vasija deformable tal como una vejiga. La presión aplicada provoca que se dispense el fármaco desde el depósito.

EJEMPLO 3

Flexura del bimorfo electroquímico

En este ejemplo predictivo, la estructura bimórfica del EJEMPLO 2 se fabrica en forma de un semicírculo o flexura con forma de "U", como se muestra en las FIGS. 3A-C. Un extremo de la flexura se ancla a un soporte o alojamiento del dispositivo dispensador, mientras que el otro extremo es libre para desplazarse a medida que el bimorfo sufre una flexura. Con la descarga de la celda electroquímica, la flexura se extiende hacia fuera, y el extremo libre de la flexura aplica una fuerza a una vejiga que contiene fármaco, dispensando un fármaco a través de un orificio o válvula de la vejiga.

EJEMPLO 4

Actuador que cambia de forma autoalimentado, con amplificación acumulada

En este Ejemplo, se fabricó y se estudió una celda electroquímica para determinar su capacidad para actuar con la aplicación de un voltaje o corriente. Se prensó un pelete poroso a partir de polvo de estaño de malla ~325 (99,8% [base en metales], Alfa Aesar) en una matriz de 1,3 cm (½ pulgadas) de diámetro bajo 3,3 kN (750 lbf). El pelete pesó 0,625 g y se midió para que tuviese un grosor de 0,89 mm. El pelete se soldó a papel metálico de cobre de 15 micrómetros de grosor usando una soldadura de Bi-Sn-Ag (Indium Corporation of America) y flujo #5RMA (Indium Corporation of America) calentando el ensamblaje en un horno de aire a 180°C durante 30 minutos. Este ensamblaje de electrodo se usó como el

electrodo positivo en la celda electroquímica, mientras que, como electrodo negativo, se usó papel metálico de litio (~0,8 mm de grosor, Aldrich).

Se usaron dos capas de separador Celgard 2400 para separar el electrodo positivo de estaño y el electrodo negativo de papel metálico de litio. El electrodo de papel metálico de litio se unió a un colector de corriente hecho también de papel metálico de cobre de 15 micrómetros de grosor. Se usó un electrolito líquido que consiste en LiPF_6 1,33 M disuelto en un disolvente mixto de carbonato de etileno, carbonato de propileno, carbonato de dimetilo, y carbonato de etilo y metilo (4:1:3:2 en volumen). La celda se cerró herméticamente en una envoltura hecha de un material para embolsar de polietileno, usando un sellador térmico. Con el ensamblaje, el voltaje de circuito abierto de la celda fue 2,8-2,9V, mostrando que estaba en el estado cargado. Con la descarga, el voltaje de la celda cayó rápidamente hasta un valor relativamente constante de 0,5-0,4V, como es característico de la celda electroquímica de Sn-Li.

La celda se descargó a través de un resistor de 1 ohmio que conectó los colectores de corriente positiva y negativa. El desplazamiento medido normal al plano del disco de estaño y del papel metálico de litio mientras la celda estaba se descargó se midió usando un transformador diferencial de variable lineal (LVDT) de Micro-Epsilon. Las lecturas se midieron mediante un dispositivo de adquisición de datos National Instruments NI-USB 6009 con interfaz con LabView (National Instruments). La FIG. 17 muestra una gráfica del desplazamiento resultante de este experimento como función del tiempo.

Tras una compresión pequeña inicial provocada por la fluencia del litio y separador bajo la pequeña fuerza aplicada del LVDT, el actuador se extendió 1,8 mm a medida que se descargó durante un período de 11 horas. Este desplazamiento absoluto excedió el grosor inicial del pelete de Sn en alrededor de un factor de dos. La inspección del actuador desmontado tras el ensayo mostró que se había producido la descarga, erosionándose el litio del electrodo negativo y aleándose con el pelete de estaño de un lado. Se observó fácilmente que el desplazamiento del actuador fue debido a la deformación del pelete cilíndrico de estaño en una forma "abarquillada", siendo la superficie convexa el lado que mira al separador y al electrodo de litio. De este modo, se observó que el cambio de forma del pelete de estaño fue debido a la creación de una tensión diferencial a través del pelete, mirando el lado del electrodo de litio que sufre expansión. La carga mecánica en la dirección de desplazamiento normal al plano del pelete tras la deformación mostró que se pudo soportar una carga de más de 1 kg sin fractura del pelete deformado. De este modo, el actuador tiene una rigidez sustancial, que sería útil para aplicaciones tales como la dispensación o bombeo de una vejiga llena de fluido, como en aplicaciones de suministro de fármacos en las que el fluido se puede dispensar a través de una o más agujas o microagujas. Colocando el actuador de este ejemplo próximo a tal vejiga llena de fluido, y encerrando el conjunto en un recipiente rígido, se podría obtener un dispositivo de suministro de fármacos.

Tal dispositivo de suministro de fármacos sería adecuado, por ejemplo, para un suministro de insulina durante 3 días (72 h). La insulina de actuación rápida, tal como el producto de Lilly Lispro®, se envasa generalmente como disoluciones con concentración de 100 unidades por ml. La carga útil diaria total de disolución de insulina puede ser aproximadamente 50 unidades o 0,5 ml. De este modo, una bomba con un suministro de tres días puede proporcionar un volumen total de ~2,0 ml. Por ejemplo, el actuador descrito en este Ejemplo produjo un desplazamiento de más de 1,5 mm, el cual, cuando actúa sobre un depósito de 13 cm^2 de área, puede obtener fácilmente el volumen deseado de 2,0 ml. Los niveles basales típicos de insulina se pueden ajustar entre 0,5 y 1,5 unidades por hora. Una dosis de bolo para una comida puede consistir en 1 unidad por 10 g de hidrato de carbono consumido, de manera que se puede desear tanto como 10 unidades para una comida. La farmacodinámica de la insulina de actuación rápida sugiere que la dosis se puede suministrar durante 15 minutos. De este modo, la tasa pico de suministro puede corresponder a 5% del volumen total durante 15 minutos. Tomando un desplazamiento de 1,5 mm para que corresponda a un suministro completo de una carga útil de insulina de 2 ml, el actuador en este ejemplo puede satisfacer fácilmente el requisito de velocidad de bolo. A fin de ralentizar la velocidad para satisfacer el requisito de velocidad basal, se puede implementar un incremento en la resistencia de la carga externa o control del ciclo de trabajo, como se describe más abajo en el Ejemplo 7.

Este Ejemplo puede demostrar el actuador electroquímico y el dispositivo de suministro de fármacos en ciertas realizaciones de la invención, demostrando la actuación electroquímica debido a la creación de una tensión diferencial a través de un electrodo. La consideración del cambio neto de volumen del actuador durante la descarga de la celda mostró que el desplazamiento obtenido no estaba correlacionado con el cambio neto de volumen, y fue de hecho de signo opuesto al cambio neto de volumen de la celda. Comparando el volumen molar parcial de litio en diversas aleaciones de Li_xSn con el volumen molar de litio puro, se observó que el litio puro tuvo un mayor volumen molar, y por lo tanto la descarga de una celda en la que el litio fue el electrodo negativo dio como resultado una disminución neta del volumen. Por ejemplo, $\text{Li}_{2,5}\text{Sn}$, un compuesto de estequiometría Li/Sn relativamente baja, tuvo un volumen molar de 38,73 $\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$. Puesto que el Sn metálico puro tiene un volumen molar de 16,24 $\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$, la diferencia,

22,49 cm³ mol⁻¹, del compuesto fue el volumen ocupado por el 2,5 Li en Li_{2,5}Sn. En comparación, el volumen molar de Li puro fue 13,10 cm³ mol⁻¹, de manera que 2,5 moles de Li metálico tendrían un volumen de 32,75 cm³. Por lo tanto, la descarga completa de una celda para formar Li_{2,5}Sn en el lado del electrodo positivo daría como resultado la transferencia de 2,5 moles de litio desde el electrodo de Li al Sn, dando como resultado una disminución neta en el volumen del dispositivo. De forma similar, el volumen molar de Li en Li_{4,4}Sn, un compuesto de estequiometría relativamente elevada, es 42,01 cm³ mol⁻¹, con lo que 4,4 moles de Li metálico puro tienen un volumen de 57,62 cm³ mol⁻¹. Nuevamente, la descarga de tal celda da como resultado una disminución neta del volumen. El desplazamiento hacia fuera o positivo observado en el actuador de este ejemplo se produjo a pesar del cambio negativo de volumen con la descarga. El modo de deformación de tipo flexura o “abarquillado” del actuador amplificó la deformación debido a tensión diferencial a través del pelete.

EJEMPLO 5

Descarga galvanostática de un actuador electroquímico

En el siguiente ejemplo, se estudió la descarga galvanostática de una celda electroquímica. Se fabricó una celda electroquímica como se describe en el Ejemplo 4, con cinta adhesiva de cobre conductora usada como el contacto entre el pelete de estaño poroso y el colector de corriente de cobre, en lugar de un soldador. La celda se descargó galvanostáticamente (corriente de descarga constante) usando un probador de baterías Maccor 4300 (Maccor). El pelete de estaño pesó 0,628 g, y se midió para que tuviese un grosor de 1,06 mm. La capacidad teórica del pelete fue 624 mAh, suponiendo que todo el estaño estaba litiado al compuesto Li_{4,4}Sn. Con el montaje, el voltaje de circuito abierto de la celda fue 2,8-2,9V, mostrando que estaba en el estado cargado. La celda se descargó a 0,88 mA hasta 0,01V. La capacidad de descarga fue 56,22 mAh, mostrando que la celda se descargó hasta sólo 9% de su capacidad teórica durante el tiempo de descarga de 63,6 h. Sin embargo, se observó que el pelete de Sn se había abarquillado de la misma manera y hasta aproximadamente la misma deformación que el actuador en el Ejemplo 1. Este Ejemplo demostró el control limitado por la corriente de un actuador electroquímico que se puede descargar espontáneamente y actuar si los conductores positivo y negativo se cerraban en un circuito externo.

EJEMPLO 6

Actuadores bimórficos electroquímicos

Se fabricó un electrodo bimórfico enmascarando un lado de un papel metálico de cobre de 50 micrómetros de grosor y 40 mm x 5 mm de área con cinta adhesiva Kapton, y sumergiendo el papel metálico en estaño fundido para revestir un lado con una capa de estaño. Se esperó que, con la litiación electroquímica del estaño, la restricción proporcionada por el papel metálico de cobre daría como resultado la flexión o “rizado” de la estructura bimórfica, siendo el lado convexo el estaño litiado. Una celda electroquímica como aquellas en los Ejemplos 4 y 5 se ensambló usando este bimorfo como el electrodo positivo, ensamblado con la capa de estaño que encara al separador y el electrodo negativo de papel metálico de litio. Con el ensamblaje, el voltaje de circuito abierto de la celda fue 2,8-2,9V, mostrando que la celda estaba en el estado cargado. La celda se descargó galvanostáticamente hasta 0,01 V con una corriente de 0,089 mA. La capacidad de descarga fue 7,7 mAh, representando alrededor de 50% del estado de descarga para un grosor de la capa de estaño de alrededor de 10 micrómetros y suponiendo una composición de Li_{4,4}Sn completamente litiada. Tras la descarga, la celda se desmontó, y el electrodo bimórfico de estaño-cobre mostró una flexión sustancial en todos los bordes libres del polimorfo, demostrando un cambio de forma.

En otros experimentos, muestras de papel metálico de estaño metal de 0,05 mm (99,999% [base en metales], Alfa Aesar) y 0,10 mm (99,99% [base en metales], Alfa Aesar) de grosor se unieron cada uno a un papel metálico de cobre de 15 micrómetros de grosor, formando electrodos bimórficos planos de 20 mm x 5 mm de área. Las celdas electroquímicas se construyeron usando dos capas de separador Celgard 2400 para separar el electrodo positivo bimórfico de estaño/cobre y un electrodo negativo de papel metálico de aluminio de 0,4 mm de grosor (Aldrich). Para cada celda, el electrodo de papel metálico de aluminio se unió a un colector de corriente hecho también de papel metálico de cobre de 15 micrómetros de grosor, y se usó un electrolito líquido que consiste en LiPF₆ 1,33 M disuelto en un disolvente mixto de carbonato de etileno, carbonato de propileno, carbonato de dimetilo, y carbonato de etilo y metilo (4:1:3:2 en volumen). Cada celda se cerró herméticamente en una envoltura hecha de material de embolsar de polietileno, usando un sellador térmico.

Las celdas se descargaron galvanostáticamente usando un probador de baterías Maccor 4300 (Maccor). La celda hecha usando papel metálico de estaño de 0,10 mm de grosor se descargó a 0,4178 mA hasta 0,01V. La capacidad de descarga fue 1,65 mAh (4% de la capacidad teórica de descarga). En la

FIG. 19 se muestra el perfil de descarga para este dispositivo. Con el desmontaje, se observó que el electrodo bimórfico está "rizado" en todos los bordes libres, demostrando un cambio de forma severo.

5 La celda hecha usando un papel metálico de estaño de 0,05 mm se descargó a 0,4076 mA hasta que la capacidad de descarga fue 1,65 mAh (4% de la capacidad teórica). En la FIG. 20 se muestra el perfil de descarga para este dispositivo. Similar al bimorfo de papel metálico de estaño de 0,10 mm, este dispositivo, con el desmontaje, también mostró flexión en todos los bordes libres del bimorfo.

10 Estos ejemplos demostraron diversos actuadores bimórficos electroquímicos de la invención. Estos resultados también muestran que puede no ser necesario descargar completamente las celdas electroquímicas de la invención a fin de obtener un cambio de forma significativo, sino que la tensión diferencial resultante de sólo una descarga de unos cuantos por cientos de la capacidad teórica de la celda puede ser suficiente para lograr la actuación deseada.

EJEMPLO 7

Control del ciclo de trabajo de un actuador electroquímico

15 Un actuador electroquímico de diseño similar al descrito en el Ejemplo 1 se sometió a una descarga controlada por el ciclo de trabajo, a fin de obtener una velocidad lenta de deformación. El ciclo de trabajo se controló mediante un relé electrónico (Radio Shack), que se apagó y se encendió a través de control de corriente desde un probador de baterías Maccor 4300 (Maccor), conectado en serie con el resistor de carga externa de 1 ohmio a través de los terminales de la celda electroquímica. El relé se cerró mientras recibía corriente desde el probador de baterías, y se abrió cuando se interrumpió la corriente. Se configuró un ciclo de trabajo de 20%, en el que la corriente se encendió durante 50 ms de un período total de 200 ms. La FIG. 18 muestra una gráfica de la curva de desplazamiento para el actuador que cambia de forma electroquímico, controlado por un ciclo de trabajo de 20%. El desplazamiento resultante del dispositivo, mostrado en la FIG. 18, demostró la deformación del actuador a una velocidad controlada baja. Como se describe aquí, un método alternativo para obtener una velocidad de deformación baja controlada puede ser descargar el actuador en la FIG. 18 a través de una carga externa de mayor resistencia.

EJEMPLO 8

Actuador electroquímico autoalimentado que tiene un mayor voltaje motriz

30 En algunas circunstancias, puede ser deseable un mayor voltaje de descarga medio que aquel para los ejemplos precedentes que utilizan estaño y litio metálico, tal como cuando se necesita un voltaje motriz sustancial, incluso en presencia de una polarización significativa de la celda. El antimonio puede ser un material de electrodo que cambia de forma útil para tales aplicaciones, debido a su voltaje de circuito abierto relativamente mayor frente a litio metálico (~0,95V). Se preparó un dispositivo electroquímico como en el Ejemplo 1, usando un polvo de antimonio de malla -325 (99,5% [base en metales], Alfa Aesar) en lugar del polvo de estaño. El polvo de antimonio se prensó a 2250 lbf en una matriz de ½ pulgadas de diámetro. El pelete resultante tuvo 0,687 g y un grosor de 1,31 mm, que corresponde a una capacidad teórica de 454 mAh. La muestra se descargó galvanostáticamente a una corriente de 3,025 mA hasta 0,01V. La capacidad de descarga fue 49,98 mAh (11% de capacidad teórica), y dio como resultado una deformación severa del pelete de antimonio.

40 Aunque se han descrito e ilustrado aquí varias realizaciones de la presente invención, aquellos de pericia normal en la técnica idearán fácilmente una variedad de otros medios y/o estructuras para llevar a cabo las funciones y/u obtener los resultados y/o una o más de las ventajas descritas aquí, y cada una de tales variaciones y/o modificaciones se considera dentro del alcance de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1.- Un actuador electroquímico para administrar un fármaco en un cuerpo, que comprende:

al menos un electrodo negativo (214);

5 al menos un electrodo positivo (212); y

una especie (218),

10 en el que el actuador electroquímico se somete a un voltaje o corriente aplicada, caracterizado porque la aplicación del voltaje o corriente, o su cese, incluye la intercalación de la especie (218) en al menos un electrodo del actuador electroquímico, dando como resultado un cambio volumétrico o dimensional del actuador electroquímico, y porque el cambio volumétrico o dimensional provoca la administración de un fármaco en un organismo.

15 2.- Un actuador electroquímico como en la reivindicación 1, en el que el actuador es una bomba de infusión que comprende al menos una celda electroquímica que comprende el electrodo negativo (214), el electrodo positivo (212) y la especie (218), y en la que el electrodo negativo (214) y/o positivo (212) sufre un cambio dimensional con la carga y/o descarga para provocar la infusión de un fluido en un cuerpo.

20 3.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 2, en el que, con la carga y/o descarga, la especie de intercalación (218) se intercala, desintercala, oxida, reduce, o galvaniza con una primera porción de la celda electroquímica en un grado diferente que con una segunda porción de la celda electroquímica, y la primera porción experimenta un cambio dimensional resultante con relación a la segunda porción, impartiendo de ese modo una tensión diferencial entre las porciones primera y segunda, provocando un desplazamiento de al menos una porción de la celda electroquímica.

25 4.- Un actuador electromecánico de la reivindicación 2 ó 3, en el que la especie de intercalación (218) interacciona con una porción inorgánica de al menos un electrodo de la celda electroquímica, dando como resultado un cambio dimensional de la celda electroquímica.

5.- Un actuador electromecánico como en cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-4, en el que uno o ambos electrodos, con la carga o descarga, sufre un cambio de dimensión que comprende flexión, curvado, o abarquillado.

30 6.- Un actuador electromecánico como en cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-5, construido y dispuesto para descargarse espontáneamente.

7.- Un actuador electromecánico como en cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-6, construido y dispuesto para ser cargado en la fábrica, y descargado parcialmente tras el uso, o ya no se carga después de la primera descarga.

35 8.- Un actuador electromecánico como en cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-6, construido y dispuesto para ser descargado en la fábrica, y cargado durante el uso.

9.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 2 y cualquiera de las reivindicaciones anteriores 3-7, en el que la velocidad de infusión es constante o variable.

40 10.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 2 y cualquiera de las reivindicaciones anteriores 3-7, en el que la velocidad de infusión se controla controlando la velocidad de descarga de la celda, o variando la resistencia de un circuito externo a través del cual se descarga la celda.

11.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 2 y cualquiera de las reivindicaciones anteriores 3-10, teniendo la celda electroquímica un ciclo de trabajo, en el que el ciclo de trabajo se controla abriendo y/o cerrando un circuito externo asociado con la celda electroquímica.

45 12.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 11, en el que el circuito externo comprende un resistor.

13.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 2 y cualquiera de las reivindicaciones anteriores 3-12, en el que la infusión comprende infusión subcutánea, infusión intravenosa, o infusión intratecal.

14.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 2 y cualquiera de las reivin-

dicaciones anteriores 3-13, que comprende además un depósito situado adyacente a la celda electroquímica, comprendiendo el depósito el fluido,

en el que, con la carga o descarga, el cambio dimensional aplica una fuerza sobre un depósito (365) y provoca un desplazamiento de volumen del fluido desde el depósito (365), provocando de ese modo la infusión del fluido en el cuerpo.

5

15.- Un actuador electromecánico como en cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-13, en el que la especie de intercalación es un protón, ion alcalino, complejo iónico, ion hidroxilo, ion carbonato, ion clorato, ion sulfato, o ion fosfato.

10

16.- Un actuador electromecánico como en cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-14, en el que al menos uno del electrodo negativo o electrodo positivo comprende uno o más de Al, Au, Ag, Ga, Si, Ge, Ti, Sn, Sb, Pb, Zn, carbono, grafito, carbono duro, carbono mesoporoso, un óxido, óxido de intercalación, óxido estratificado, mineral de arcilla, sulfuro, sulfuro estratificado, TiS_2 , MoS_2 y WS_2 .

17.- Un actuador electromecánico como en cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-16, en el que el fluido comprende un líquido, una mezcla de sólido-líquido, una pasta, o un gel.

15

18.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 1-17, en el que el fluido contiene un fármaco.

19.- Un actuador electromecánico como en la reivindicación 18, en el que el fármaco es insulina.

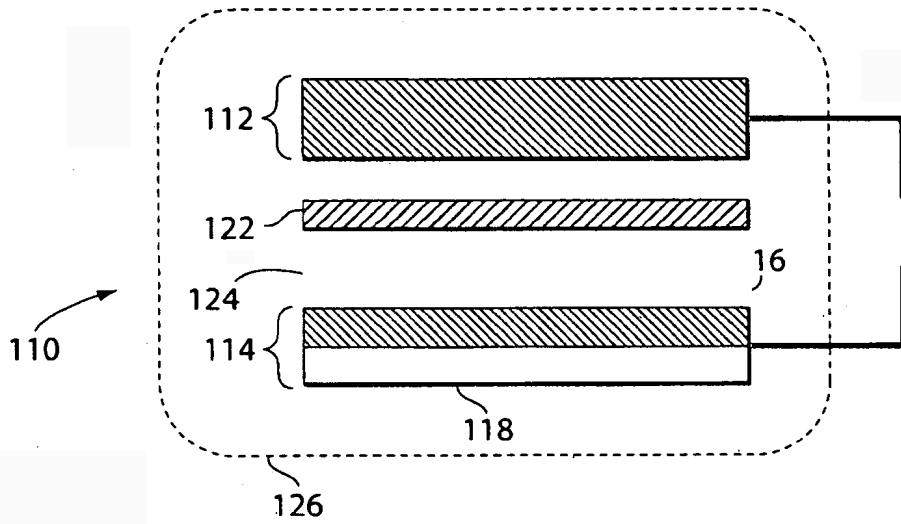


Fig. 1A

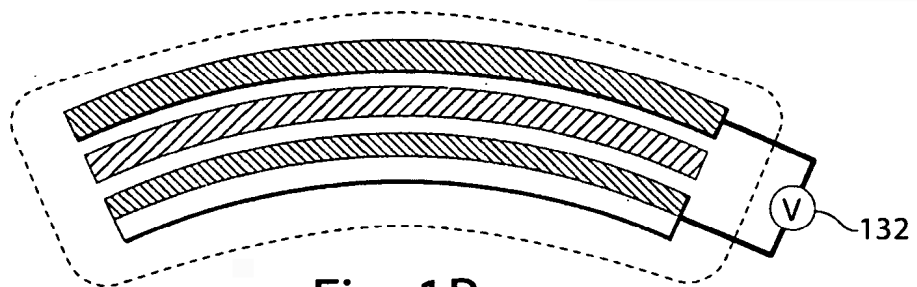


Fig. 1B

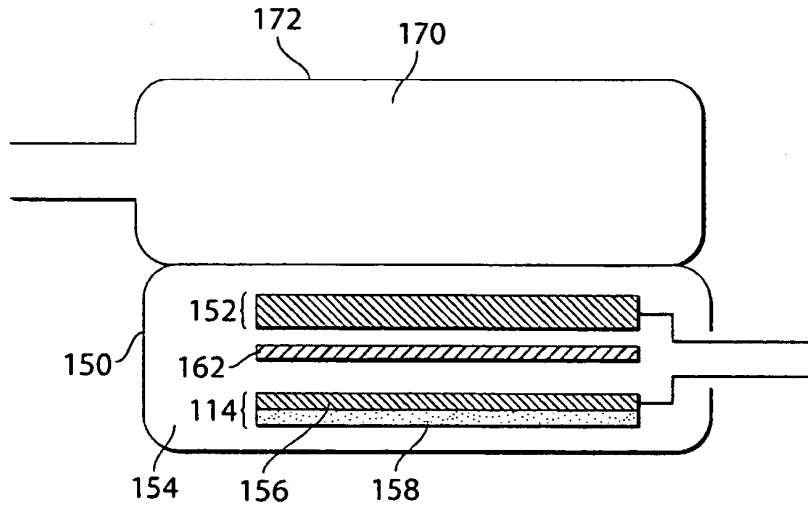


Fig. 2A

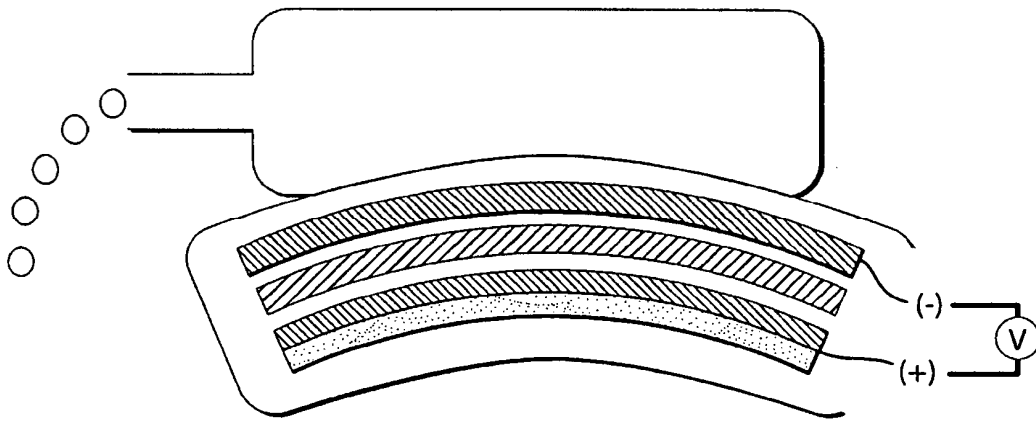


Fig. 2B

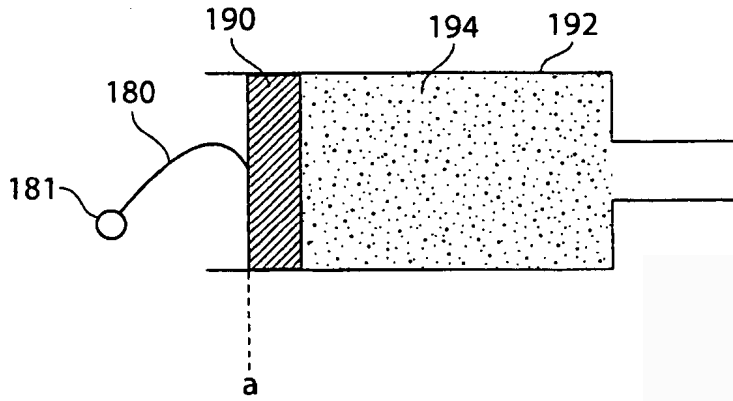


Fig. 3A

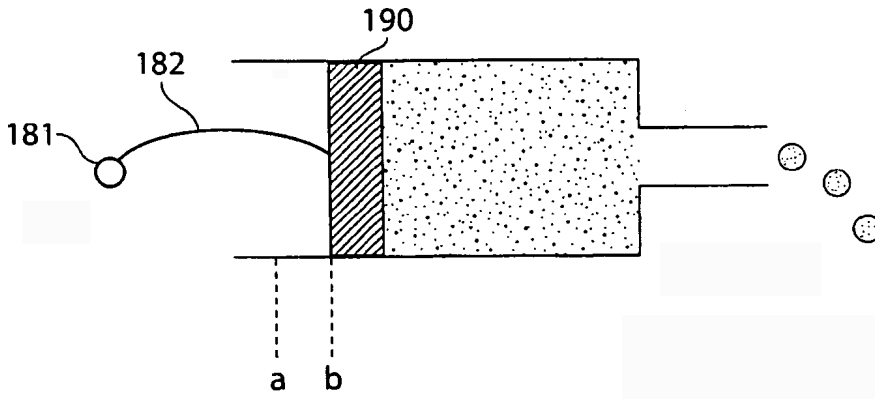


Fig. 3B

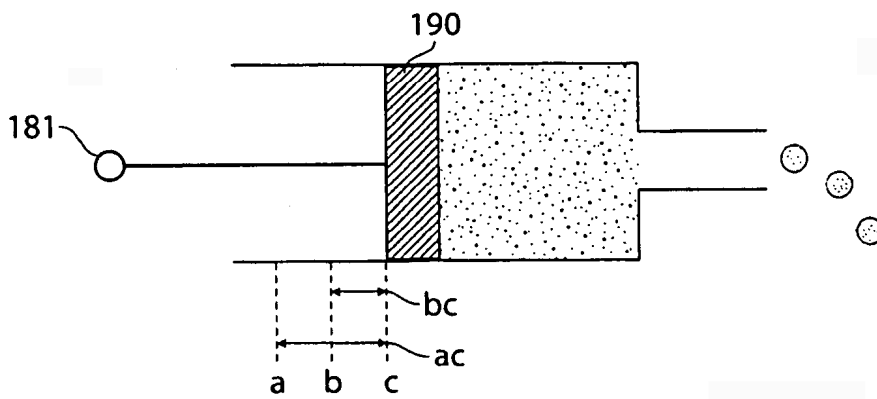


Fig. 3C

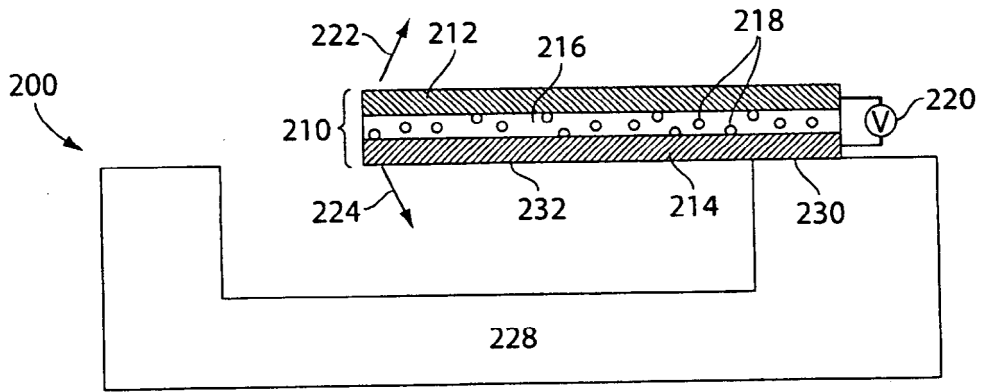


Fig. 4

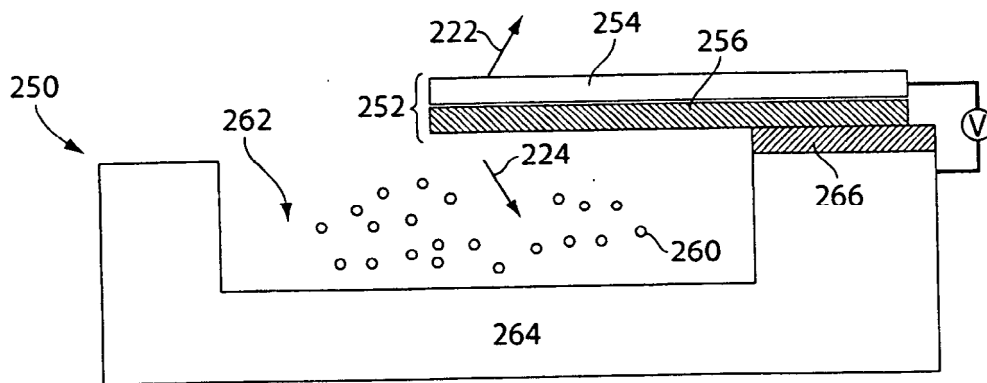


Fig. 5

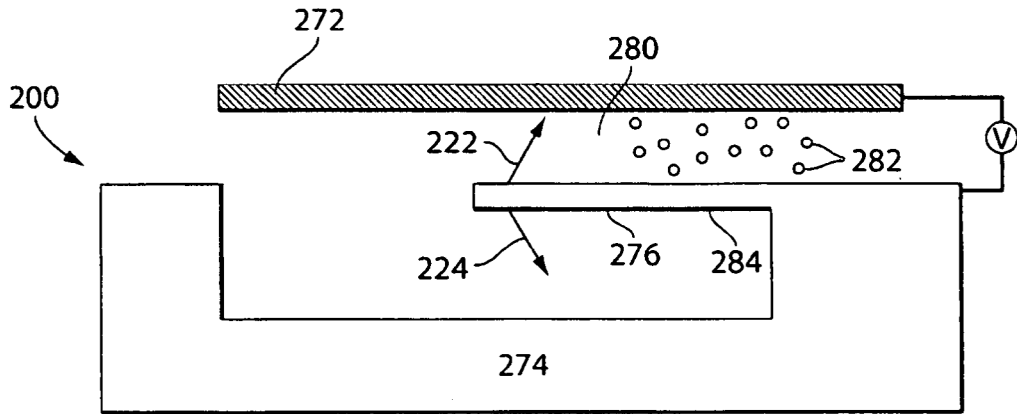


Fig. 6

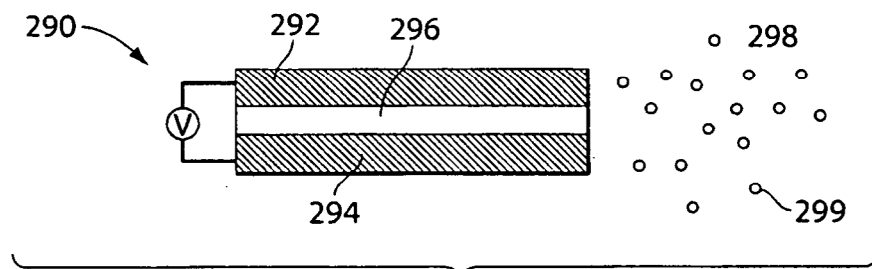


Fig. 7

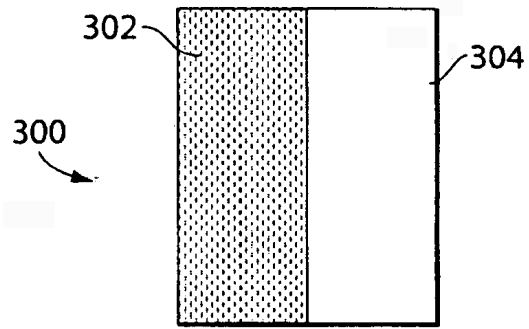


Fig. 8A

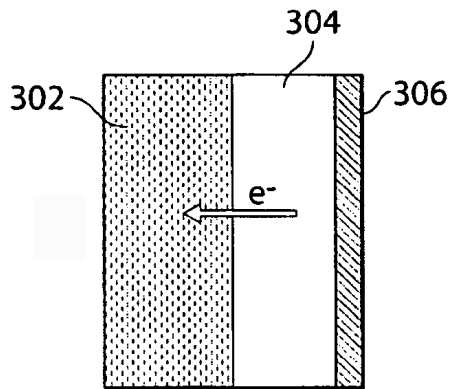


Fig. 8B

(Técnica Anterior)

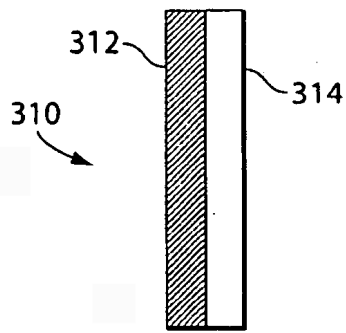


Fig. 9A

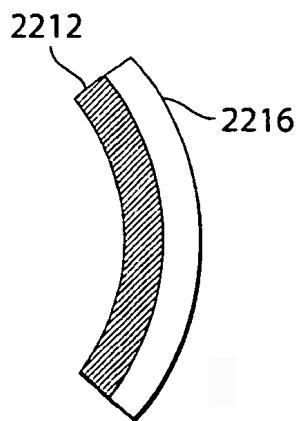


Fig. 9B

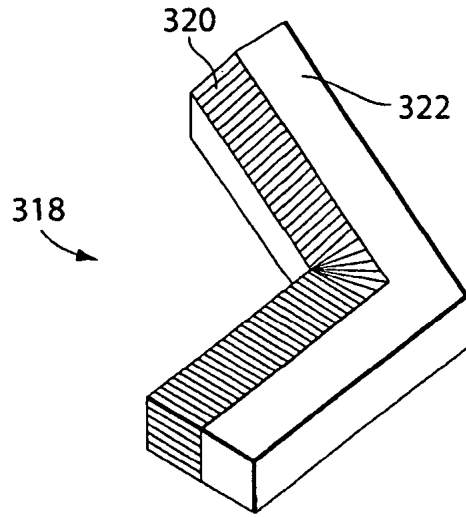


Fig. 10A

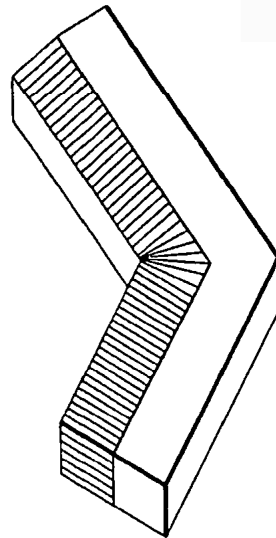


Fig. 10B



Fig. 11A

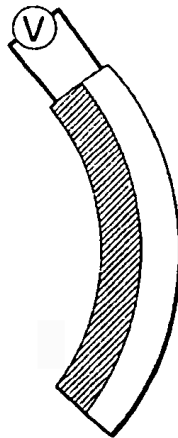


Fig. 11B

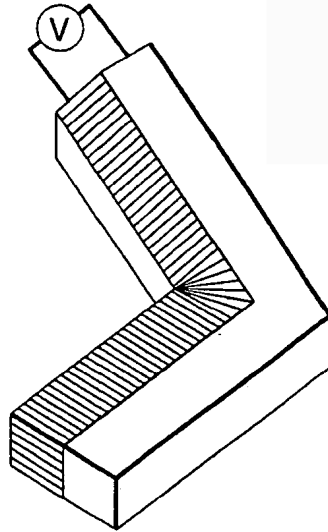


Fig. 12A

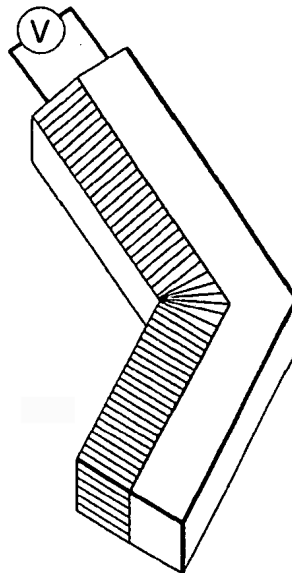


Fig. 12B

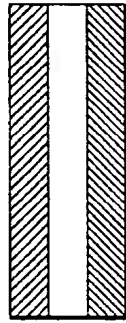


Fig. 13A

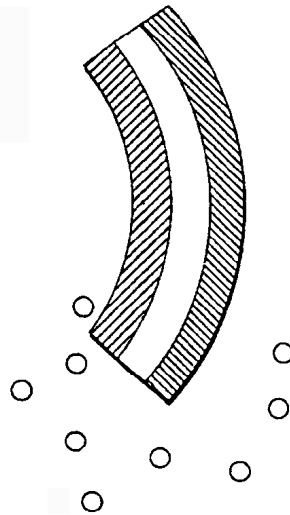


Fig. 13B

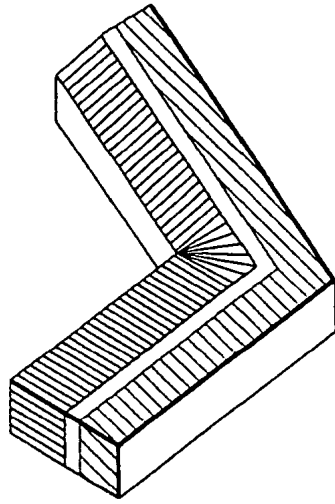


Fig. 14A

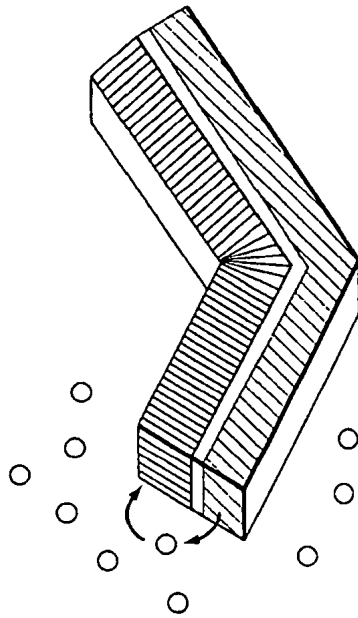


Fig. 14B

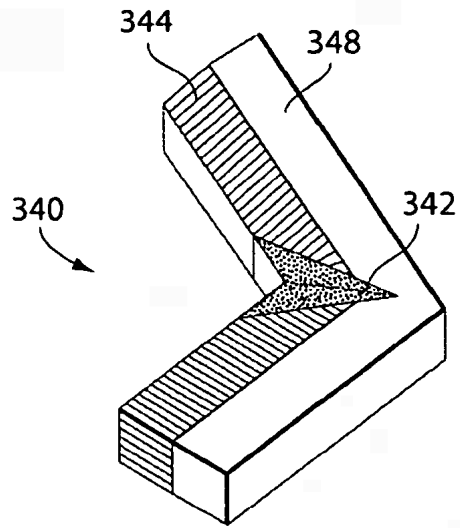


Fig. 15A

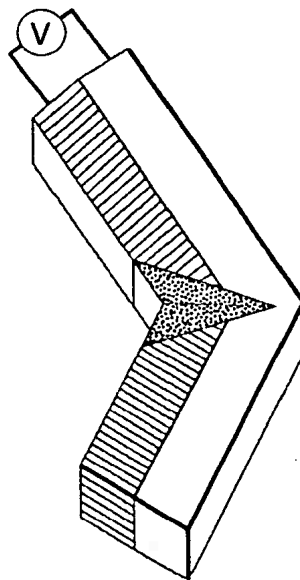


Fig. 15B

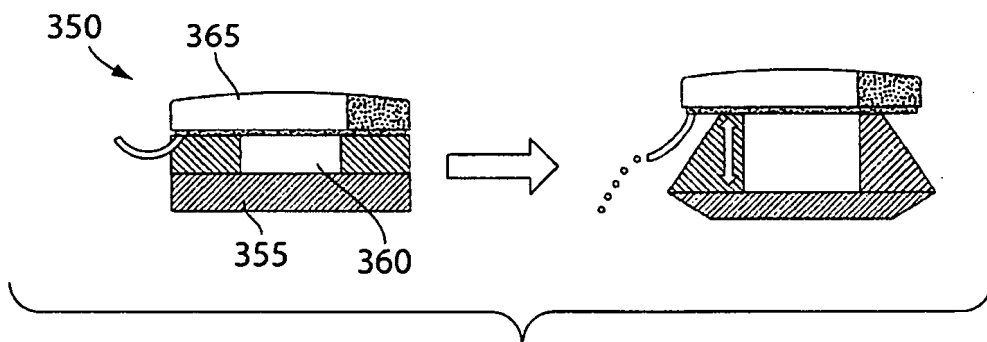


Fig. 16

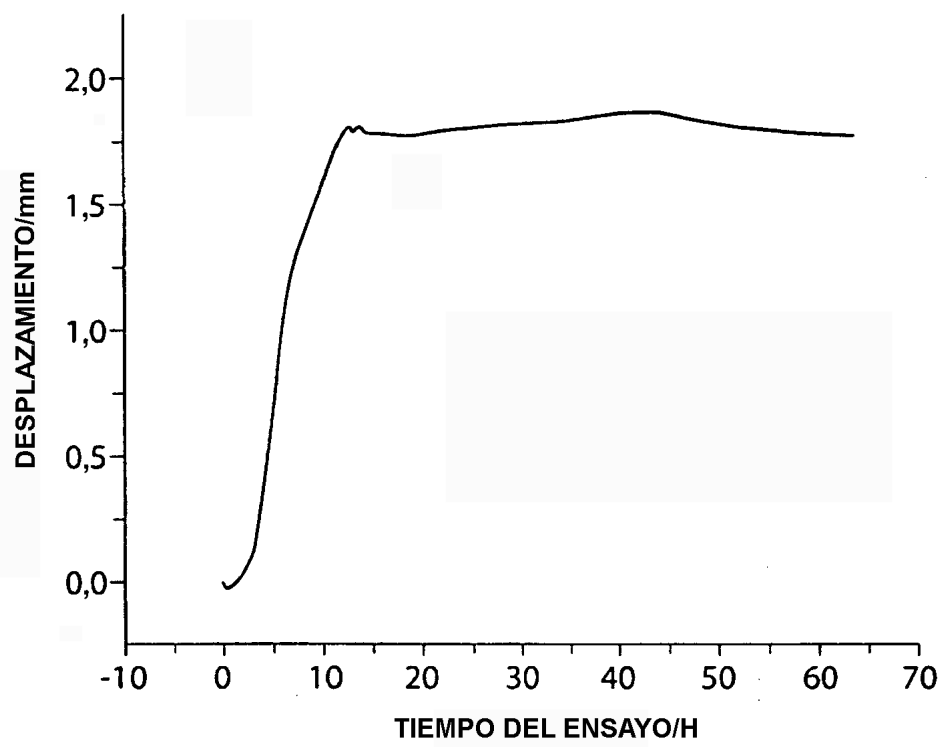


Fig. 17

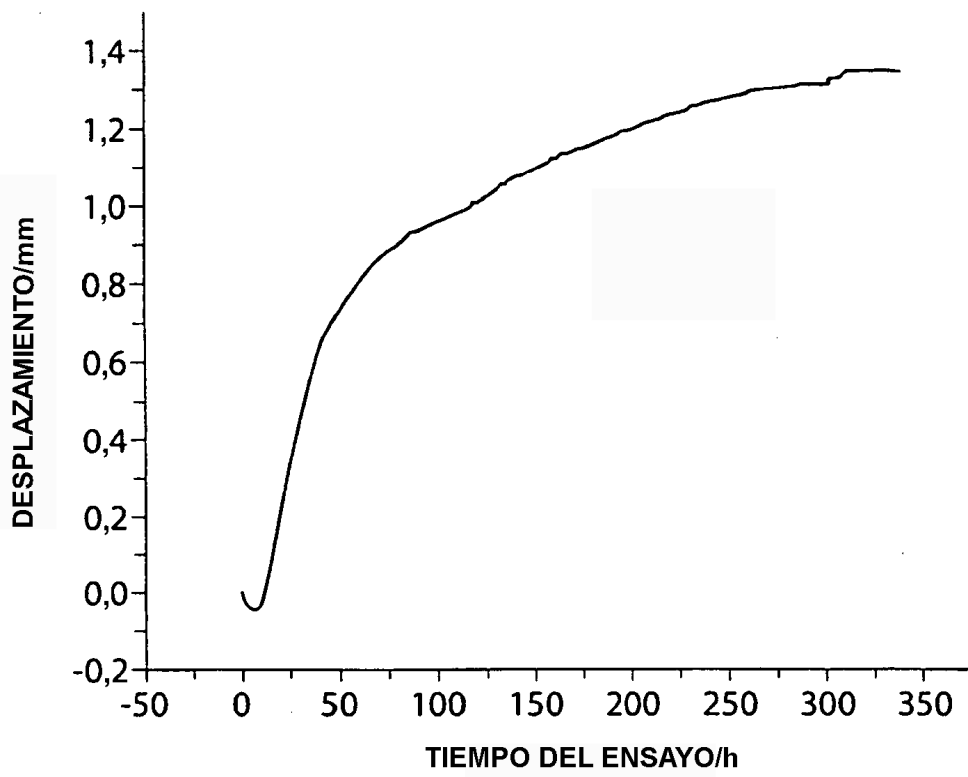


Fig. 18

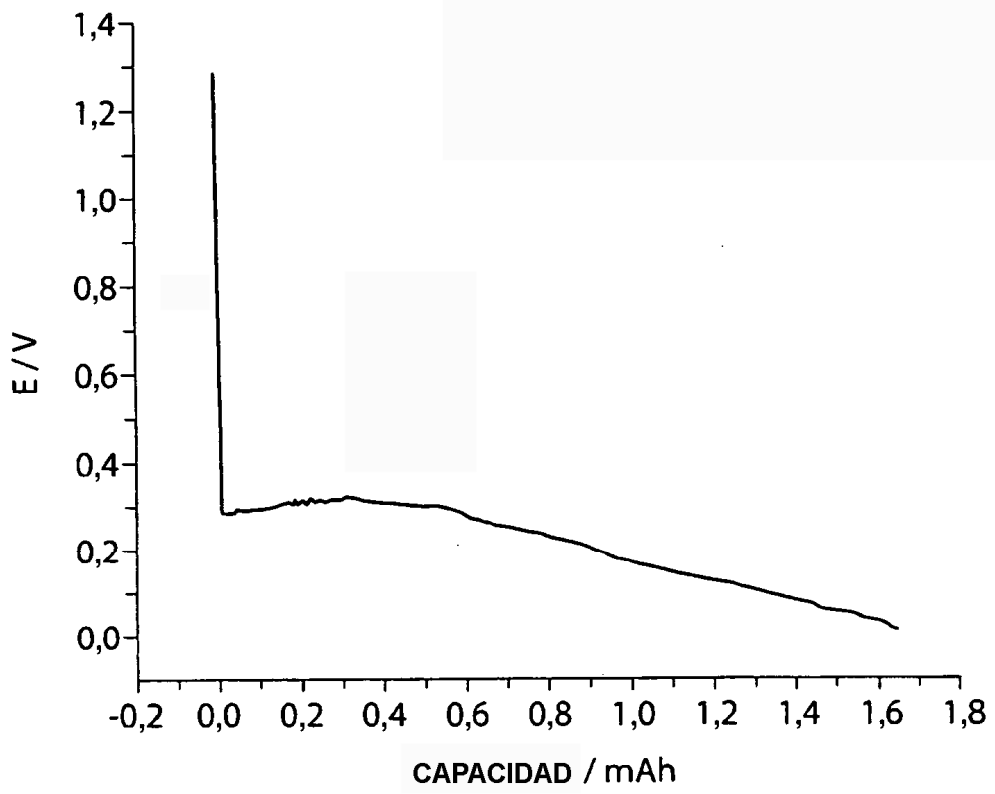


Fig. 19

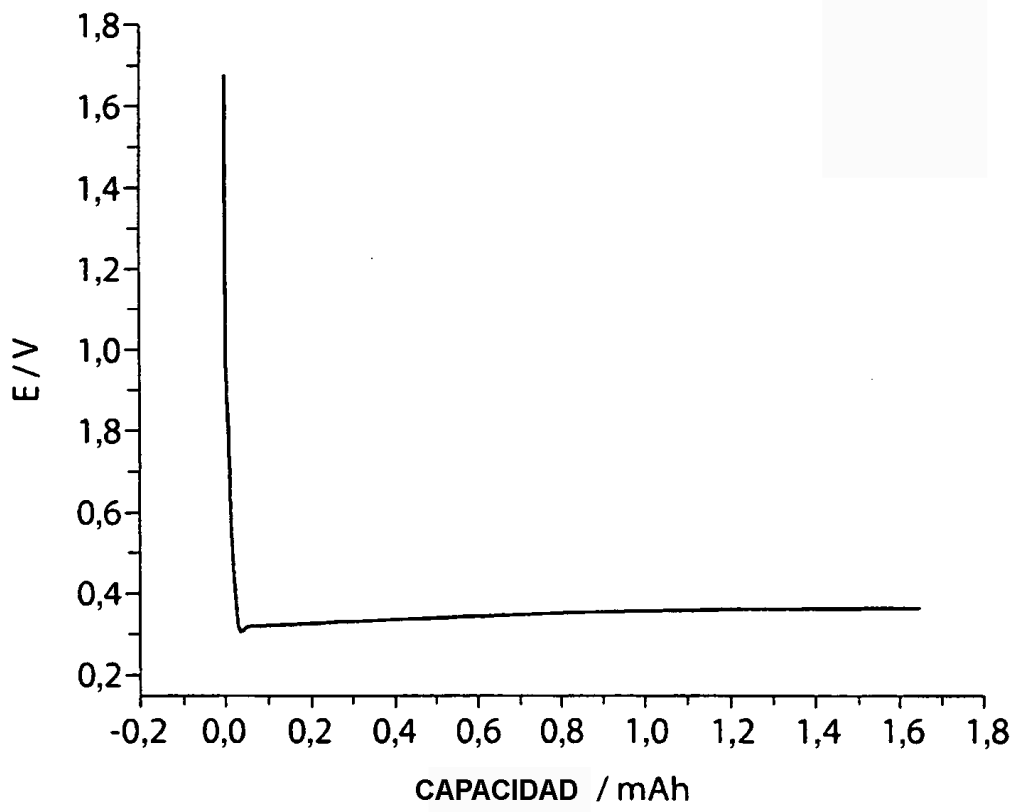


Fig. 20