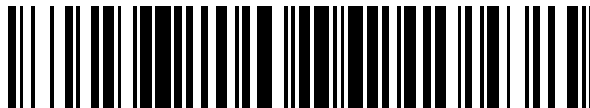


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 562 603**

51 Int. Cl.:

**B01D 61/02** (2006.01)

**F03G 7/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.11.2007 E 07839987 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.01.2016 EP 2083937**

54 Título: **Motor de calor osmótico**

30 Prioridad:

**09.11.2006 US 858245 P**

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

**07.03.2016**

73 Titular/es:

**YALE UNIVERSITY (100.0%)  
Two Whitney Avenue  
New Haven, CT 06510, US**

72 Inventor/es:

**MC GINNIS, ROBERT L.;  
ELIMELECH, MENACHEM y  
MC CUTCHEON, JEFFREY**

74 Agente/Representante:

**LAZCANO GAINZA, Jesús**

**ES 2 562 603 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

Motor de calor osmótico

5 Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

Esta solicitud reivindica el beneficio de la Solicitud Provisional de los Estados Unidos núm. 60/858,245, presentada el 9 de noviembre de 2006.

10 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un motor de calor osmótico para convertir la energía térmica en trabajo mecánico que utiliza una membrana semipermeable para convertir la presión osmótica en energía eléctrica.

15 Antecedentes de la invención

20 El aumento de la demanda mundial de energía, junto con la ampliación de la regulación de las emisiones de dióxido de carbono, han ampliado el interés por las energías renovables y la mejora de la eficiencia en el uso de los combustibles. Sin embargo, una restricción importante en cuanto a la adopción de nuevos combustibles y tecnologías de energía es el costo de la energía producida por estos medios. Aunque los subsidios y otras formas de apoyo artificial pueden ayudar en la introducción de estas fuentes de energía renovables, el desplazamiento exitoso de los combustibles tradicionales debe ser impulsado necesariamente por los costos totales de energía.

25 La ósmosis por presión retardada (PRO), o "energía de la salinidad", como se denomina a menudo, es un proceso de conversión de energía a base de membrana de presión osmótica. La PRO utiliza el flujo osmótico a través de una membrana semipermeable para generar electricidad. Los procesos PRO se discuten, por ejemplo en la patente de los Estados Unidos núm. 3,906,250 de Loeb, patente de los Estados Unidos núm. 3,587,227 de Weingarten y otros, y patente de los Estados Unidos núm. 3,978,344 de Jellinek.

30 El documento US 2006/225420 se considera como la técnica anterior más cercana a la materia de la reivindicación 1.

35 Inicialmente, los lugares considerados adecuados para usar tecnología PRO se concentraron en los deltas de los ríos en los cuerpos de agua salina tales como los océanos, el Mar Muerto o el Gran Lago Salado. En estos lugares, existe un gradiente de presión osmótica donde el agua dulce de un río se mezcla libremente con agua de mar. El proceso PRO utiliza esta energía química y la convierte en electricidad. En los procesos PRO de la técnica anterior, el agua salina se presuriza y se coloca opuesta al agua fresca a través de una membrana semipermeable. La diferencia de presión osmótica entre el agua de mar y el agua dulce (que es mayor que la presión hidráulica inducida en el agua de mar) hace que se produzca el flujo osmótico a través de las membranas. A medida que se produce el flujo dentro del agua de mar presurizada, la presión se alivia por expansión a través de una turbina hidráulica (u otros medios) que genera electricidad.

40 Los procesos PRO en los deltas de los ríos, denominados, además, PRO de "lazo abierto", tienen varias limitaciones operativas y de diseño. La primera es la necesidad de pretratamiento extensivo de las corrientes de alimentación y extracción, similar al requerido en los procesos de desalinización, para impedir la contaminación de las membranas y componentes del proceso.

45 Otra dificultad se origina de las bajas presiones diferenciales osmóticas encontradas entre muchas aguas de alimentación naturales. Esto es, la diferencia de presión osmótica disponible no es extraordinariamente alta a menos que el cuerpo de agua salina sea hipersalino, tal como el Mar Muerto o el Gran Lago Salado. Desafortunadamente, el flujo volumétrico del agua en estos cuerpos de agua es algo pequeño y por lo tanto dará energía limitada incluso para un proceso PRO bien diseñado. El agua de mar, por ejemplo, tiene una presión osmótica de aproximadamente 2.53 MPa (25 atm), la cual no deja margen para las altas presiones hidráulicas que son deseables para la producción eficiente de energía. En los casos donde se consideran corrientes de concentraciones más altas, pueden usarse presiones hidráulicas más altas, pero la eficiencia del proceso sufrirá significativamente por la polarización por concentración interna (ICP) que se produce en la estructura de soporte de la membrana usada para el proceso. Este fenómeno se exagera particularmente por el mayor grosor de la capa de soporte requerido para resistir las mayores presiones hidráulicas permitidas por las corrientes más concentradas.

50 Una consideración final es la necesidad de colocar las instalaciones de energía en la interfaz entre las corrientes naturales, frecuentemente áreas de considerable importancia medioambiental, tales como estuarios, humedales y bahías.

55 Sin embargo, el obstáculo principal para un proceso PRO factible es el pobre rendimiento de la membrana. Las investigaciones anteriores sobre PRO han encontrado que el rendimiento del flujo de la membrana era demasiado pobre para hacer de la generación de energía una opción factible. Las bajas velocidades de flujo requieren el uso de más área

de membrana para lograr el flujo volumétrico suficiente para generar energía y se deben a un fenómeno denominado polarización por concentración.

El flujo se produce desde la solución de "alimentación" diluida (agua dulce) hacia la solución de "extracción" concentrada (agua de mar). A medida que esto se produce, los solutos se acumulan a lo largo de la superficie de la membrana a lo largo del lado de alimentación. En el lado del permeado de la membrana, el solvente diluye los solutos disueltos a lo largo de la superficie de la membrana. Dado que las concentraciones de soluto en la superficie de la membrana determinan la diferencia real de presión osmótica a través de la membrana, estos fenómenos de polarización por concentración deben minimizarse para asegurar flujos altos. La gravedad de los fenómenos de polarización por concentración puede mitigarse por flujo cruzado, en donde el flujo turbulento cerca de la superficie de la membrana puede disminuir el grosor de estas capas límite.

Desafortunadamente, las membranas que se usan actualmente son de estructura asimétrica. En estas membranas, una capa de separación delgada (la capa que rechaza la sal, denominada, además, la "capa activa") se soporta por una capa porosa de soporte la cual proporciona resistencia mecánica a la membrana. Estas membranas se han diseñado para procesos de membrana conducidos por presión, tales como la ósmosis inversa (RO). En la ósmosis inversa, estas capas de soporte no inhiben el flujo ya que el agua se obliga literalmente a pasar a través de la membrana por la presión hidráulica. Por otra parte, en el flujo osmótico, la fuerza impulsora de la presión osmótica se establece sólo sobre la capa activa fina. La capa de soporte poroso juega un papel importante, y a menudo obstaculiza, el rendimiento del flujo osmótico.

Como se ilustra en la Fig. 1, puede formarse una significativa capa de polarización por concentración dentro de la capa porosa de soporte en el lado de alimentación. Denominada "polarización por concentración interna" (ICP), esta capa afecta la presión osmótica en una medida mucho mayor que las capas de polarización por concentración externa a la membrana (ECP). La minimización o eliminación de la ICP es crítica para el rendimiento factible de la ósmosis por presión retardada. La membrana, sin embargo, aún debe ser capaz de rechazar la sal en un alto grado, y ser altamente permeable al agua.

Para las aplicaciones de la PRO, la solución de extracción debe tener una alta presión osmótica para generar cantidades razonables de energía. En la PRO en deltas de ríos, sin embargo, los gradientes de presión osmótica son más bien pequeños. Los gradientes más pequeños de presión osmótica requieren más área de membrana para generar grandes flujos volumétricos. Este problema, combinado con la ICP y los fenómenos de contaminación, hacen aún más pequeña la presión osmótica disponible. Otros problemas asociados con el soluto de extracción incluyen la compatibilidad con los componentes del sistema y con la membrana. El agua de mar puede ser corrosiva para las piezas metálicas y tanto el agua dulce como el agua de mar pueden contener componentes biológicos que provocan la contaminación biológica de los componentes del sistema, que incluyen la membrana.

La PRO en deltas de ríos funciona, además, en una configuración de lazo abierto. Esto significa que las soluciones de alimentación y de extracción se devuelven a los océanos después que se completa el proceso PRO. Cuando el agua de mar y el agua de río se introducen en el sistema de PRO, deben filtrarse y desinfectarse para impedir la contaminación y la formación de películas biológicas, respectivamente. Además de añadirse al costo global del proyecto, cualquier producto químico que se añada a estas aguas debe purgarse hacia el mar o eliminarse a través de medios físicos o químicos. La eliminación de los productos químicos de desinfección y de los derivados de la desinfección puede tener impactos ambientales imprevistos. La desviación del agua de los ríos también puede tener un impacto ambiental en la sensible ecología del delta de los ríos.

Así, para crear un proceso de ósmosis por presión retardada factible, se ha propuesto el uso de sistemas de PRO de ciclo cerrado, los cuales pretenden usar calor de baja temperatura para reciclar un agente osmótico. Esta estrategia no aprovecha los gradientes de salinidad natural pero en cambio explora el uso de la presión osmótica como un medio para la producción de trabajo, que permite la conversión de fuentes de calor de baja temperatura medioambientalmente benignas en energía eléctrica. En varios procesos, la solución de extracción es una solución de una sal iónica, tal como cloruro de sodio, como se describe por ejemplo en la patente de los Estados Unidos núm. 3,906,250 de Loeb. El calor aplicado al OHE volvería a concentrar la solución de extracción por la vaporización de una porción del agua en vapor, la cual se condensaría después para formar el fluido de trabajo desionizado. Otros procesos implican la remoción de un soluto orgánico volátil, o la precipitación química de los solutos seguida por su disolución nuevamente.

Una dificultad primaria enfrentada por estos OHE es la pobre eficiencia térmica debida a los altos requerimientos de entrada de calor para la vaporización del agua y del soluto orgánico. En el caso de solutos precipitables químicamente, el consumo de materias primas químicas puede plantear dificultades para la operación económica. Un desafío adicional es la dificultad de obtener la separación del soluto suficientemente completa para evitar los efectos de la polarización por concentración (CP) en el agua de entrada. Este no es un problema cuando el agua se vaporiza y vuelve a condensarse como fluido de trabajo destilado, pero podría plantear un problema significativo cuando se usan solutos de extracción removibles los cuales son difíciles de eliminar completamente.

Esto apunta a un desafío recurrente, adicional en los procesos de membrana conducidos por ósmosis - la dificultad de identificar un soluto que pueda tanto crear altas presiones osmóticas como ser altamente removible para su

reutilización. La capacidad de remoción casi completa es muy importante, porque los efectos de polarización por concentración interna en el fluido de trabajo (solución de alimentación) pueden reducir drásticamente el flujo de agua de la membrana. Así, el motor de calor osmótico ideal usaría un soluto de extracción que tiene las siguientes características: (1) muy soluble; (2) completamente removible; (3) tiene una alta difusividad para la transferencia de masa efectiva en el sistema de membrana, y (4) requiere menos calor para la remoción del soluto que el requerido para la vaporización del agua o de los solutos orgánicos altamente solubles.

La invención descrita en la presente descripción intenta superar algunos de los problemas indicados de la técnica anterior mediante la proposición de un medio alternativo de producción de energía, que usa presión osmótica para generar energía eléctrica a partir de fuentes de calor de bajo nivel. Aunque se han realizado varias investigaciones anteriores del uso de los fenómenos osmóticos para producir energía, tales como esos usados para convertir la "energía de la salinidad" a partir de la mezcla de corrientes de agua salina y dulce naturales, relativamente pocos estudios se han centrado en el uso de los fenómenos osmóticos para producir energía a través de la conversión de calor.

#### Resumen de la invención

Es un objetivo de la presente invención proporcionar un motor de calor osmótico que incluye agua diluida (casi desionizada) como un fluido de trabajo y una membrana que se configura de manera que la polarización por concentración interna no impide el flujo osmótico del agua a través de la membrana.

Es otro objetivo de la presente invención proporcionar un motor de calor osmótico que tiene un soluto de extracción que es completamente compatible con todos los componentes del sistema.

Es además otro objetivo de la presente invención proporcionar un motor de calor osmótico que usa un soluto de extracción que es muy soluble y completamente extraíble.

Es además otro objetivo de la presente invención proporcionar un motor de calor osmótico que tiene un soluto de extracción que proporciona un gradiente de presión osmótica grande

Es además otro objetivo de la presente invención proporcionar un motor de calor osmótico que mitigue los impactos ambientales del proceso PRO.

Para este fin, la presente invención se refiere generalmente a un proceso PRO de lazo cerrado que utiliza un soluto de extracción reciclable.

En una modalidad, la presente invención se refiere a un método para generar energía mediante el uso de un motor de calor osmótico de amoníaco-dióxido de carbono, que comprende las etapas de:

a) presurizar una solución de extracción concentrada hasta una presión hidráulica inferior a su presión osmótica en un primer lado de una membrana semipermeable;

b) introducir un fluido de trabajo diluido (casi desionizado) en un lado opuesto de la membrana semipermeable;

c) hacer que una porción del fluido de trabajo diluido fluya a través de la membrana semipermeable en la solución de extracción presurizada para crear un flujo de agua que expande el volumen de la solución de extracción;

d) inducir el flujo del volumen expandido de la solución de extracción a través de una turbina para producir energía; y

e) procesar el volumen expandido de la solución de extracción a través de una columna de destilación a una temperatura y presión adecuadas para separar los solutos de la solución de extracción, y de ese modo producir nuevas corrientes de la solución de extracción y del fluido de trabajo para reutilizarlas en el sistema.

#### Breve Descripción de las Figuras

Para una comprensión más completa de la invención, se hace referencia a la siguiente descripción tomada en conjunto con las figuras adjuntas, en las cuales:

La Fig. 1 representa el proceso PRO en presencia de polarización por concentración interna en el lado de alimentación de la membrana y polarización por concentración externa en el lado de la solución de extracción de la membrana.

La Fig. 2 representa un sistema de motor de calor osmótico de acuerdo con la presente invención.

La Fig. 3 representa los datos de flujo y muestra la relación entre el flujo de agua y la concentración de la solución de extracción para la membrana.

La Fig. 4 representa la densidad de energía de la membrana con relación a las presiones hidráulicas y osmóticas en el motor de calor osmótico de la invención.

5 La Fig. 5 representa la eficiencia del motor de calor osmótico como un porcentaje de la eficiencia del motor de Carnot, con relación a la diferencia entre las presiones hidráulica y osmótica de la solución de extracción.

Descripción detallada de las modalidades preferidas

10 La presente invención se refiere generalmente a un método para generar energía mediante el uso de un motor de calor osmótico de amoniaco-dióxido de carbono que comprende las etapas de:

a) presurizar una solución de extracción concentrada hasta una presión hidráulica inferior que su presión osmótica en un primer lado de una membrana semipermeable, en donde la solución de extracción concentrada comprende amoniaco y dióxido de carbono;

15 b) introducir un fluido de trabajo diluido en un lado opuesto de la membrana semipermeable, en donde el fluido de trabajo diluido comprende agua casi desionizada;

c) hacer que una porción del fluido de trabajo diluido fluya a través de la membrana semipermeable en la solución de extracción presurizada para crear un flujo de agua que expande el volumen de la solución de extracción;

20 d) inducir el flujo del volumen expandido de la solución de extracción a través de una turbina para producir energía; y

e) procesar el volumen expandido de la solución de extracción a través de una columna de destilación a una temperatura y presión adecuadas para separar los solutos de la solución de extracción, y de ese modo producir nuevas corrientes de la solución de extracción y del fluido de trabajo para volverlas a introducir en el sistema.

30 El motor de calor osmótico descrito en la presente descripción se diseña para competir con otros tipos de motores térmicos, incluyendo turbinas de gas (Ciclo de Brayton), turbinas de vapor de agua (Ciclo de Rankine), motores de combustión interna (gasolina, diesel), y motores de combustión externa (motores de Stirling).

35 La presente invención se refiere a un motor de calor osmótico de ciclo cerrado. El sistema usa una solución de extracción de amoniaco-dióxido de carbono y un fluido de trabajo de agua desionizada. El fluido de trabajo de agua desionizada comprende agua que está prácticamente (o casi) desionizada. Por casi desionizada se entiende que el fluido de trabajo de agua desionizada contiene menos de 1 ppm de amoniaco y dióxido de carbono y ningún otro soluto. La solución de extracción es muy soluble, osmóticamente eficiente y contiene solutos completamente removibles y reciclables. El uso de agua desionizada como fluido de trabajo maximiza la transferencia de masa de la membrana mediante la eliminación de los efectos de polarización por concentración interna.

40 La solución de extracción comprende sales de amonio formadas por la introducción de amoniaco y dióxido de carbono en el agua y se usa en el OHE de la invención para generar energía eléctrica. La solución de extracción se formula mediante la mezcla de sal de bicarbonato amónico con hidróxido amónico para formar una solución compleja de sales de amonio que comprenden bicarbonato amónico, carbonato amónico y carbamato amónico. La cantidad de hidróxido de amonio añadido se reduce al mínimo para reducir al mínimo la concentración de amoniaco no ionizado en la solución de extracción. La solución de extracción concentrada tiene una relación de amoniaco a dióxido de carbono de entre aproximadamente 1:1 a 2.5:1. Además, la solución de extracción tiene una concentración de entre 0.1 y 12 molar, preferentemente entre aproximadamente 3 a aproximadamente 6 molar.

50 Esta solución de extracción tiene varias características deseables, que incluyen (1) alta solubilidad de las sales de amonio; (2) relativamente bajo peso molecular y alta difusividad de las especies químicas que conducen a altas presiones osmóticas y moderados efectos de la polarización por concentración externa; (3) los solutos que son casi completamente removibles porque las sales de amonio, después del calentamiento con la solución de extracción a una temperatura y presión apropiadas (por ejemplo, 60 °C a 101.3 kPa (1 atm), se descomponen en gases de amoniaco y dióxido de carbono que pueden removerse fácilmente hasta niveles de menos que 1 ppm; y (4) la energía térmica requerida para la remoción y reciclaje de estos solutos de una cantidad de agua es significativamente menos que la requerida para vaporizar la misma agua.

60 En el motor de calor osmótico de amoniaco-dióxido de carbono de la invención, la solución de extracción concentrada se presuriza a una presión hidráulica menor que su presión osmótica, un fluido de trabajo diluido (agua desionizada que contiene menos de 1 ppm de amoniaco y dióxido de carbono) fluye a través de la membrana semipermeable en la solución presurizada, y este flujo de agua expande el volumen de la solución de extracción, lo que induce el flujo a través de una turbina, que produce energía. El calor se introduce en el motor de calor osmótico para impulsar una separación de los solutos de la solución de extracción, que resulta en las corrientes de la solución de extracción y del fluido de trabajo renovadas. Un intercambiador de presión similar a los usados en la desalinización por ósmosis inversa (RO) se usa para mantener la presión del lado de la solución de extracción de la membrana en funcionamiento en estado estacionario.

65

La presente invención usa un soluto de extracción reciclable en PRO, donde el calor se introduce en el sistema el cual sirve para regenerar el soluto de extracción y el calor en exceso se rechaza hacia el ambiente de alguna manera. El sistema se conoce como un "motor de calor osmótico" porque se absorbe y se rechaza el calor y se produce trabajo. Aunque se han configurado previamente diferentes concepciones de este tipo de sistema, el rendimiento pobre de la membrana y/o el uso ineficiente de calor limitaron el desarrollo adicional, debido en parte al rendimiento inadecuado de los agentes de la solución de extracción seleccionados y los graves efectos de polarización por concentración interna.

Con el fin de superar las deficiencias de la técnica anterior, la presente invención propone el uso de un motor de calor osmótico de amoníaco- dióxido de carbono ( $\text{NH}_3\text{-CO}_2$ ). Este motor de calor se ilustra en la Fig. 2 y usa una mezcla de gases de amoníaco y dióxido de carbono mezclados en la solución. Estos gases forman sales de amonio altamente solubles en solución, las cuales pueden generar presiones osmóticas de más de 250 atmósferas, más de 10 veces la del agua de mar. La solución de extracción es muy soluble, osmóticamente eficiente, y contiene solutos altamente removibles y reciclables. El uso de agua desionizada como fluido de trabajo maximiza la transferencia de masa de la membrana mediante la eliminación de los efectos de polarización por concentración interna. Los resultados que se proporcionan en este documento demuestran la viabilidad del motor térmico osmótico para la conversión práctica de fuentes de calor de baja temperatura en energía.

El motor de calor osmótico de la invención se basa en el uso de un fluido de trabajo de agua desionizada (es decir, que no contiene solutos disueltos o contiene pocos). El uso de este fluido como una alimentación para la membrana es ventajoso porque no se produce ICP. Aunque la fuga de sales desde la solución de extracción a través de la membrana puede provocar ICP, la membrana se selecciona para rechazar la sal en un alto grado, lo cual servirá para contrarrestar esta tendencia. La membrana es una membrana semipermeable que tiene una capa activa orientada hacia la solución de extracción y una capa de refuerzo orientada hacia la solución de alimentación. El flujo de agua que expande el volumen de la solución de extracción es típicamente al menos aproximadamente  $25 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-s}$ .

Una de las claves para el proceso de motor térmico osmótico eficiente de la invención es el calor requerido para separar el agua pura de la solución de extracción diluida. Aquí es donde se hace visible el beneficio de usar la solución de extracción de amoníaco y dióxido de carbono, porque estos gases pueden agotarse exitosamente del agua con vapor a baja temperatura. La modelación de la remoción del gas mediante el uso de Aspen HYSYS® (disponible de Aspen Technology, Burlington, Massachusetts) ha mostrado que el vapor con temperaturas tan bajas como  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  puede utilizarse bajo un proceso de agotamiento de gas al vacío. Esto deja un margen para la utilización de una variedad de fuentes de calor que tienen por lo general poca utilidad y de muy bajo a ningún costo.

El uso del motor de calor osmótico de  $\text{NH}_3\text{-CO}_2$  de calor de bajo nivel es fundamental para su implementación viable como una alternativa para generar electricidad. Las fuentes de calor de bajo nivel provienen de una variedad de industrias que incluyen fabricación de metales (fábricas de acero), fabricación de vidrio, refinación de petróleo y generación de energía termoeléctrica, a manera de ejemplo y no de limitación. Todas estas industrias usan métodos complejos para recuperar su calor residual, pero el calor de bajo nivel siempre se pierde hacia el ambiente a través del enfriamiento por agua o los gases de combustión.

También pueden usarse las fuentes renovables de calor. Las fuentes geotérmicas de calor son abundantes pero raramente son de calidad suficientemente alta para generar electricidad directamente. Por lo general, estas fuentes pueden usarse para calentar y enfriar hogares, pero también pueden usarse en una configuración de ciclo binario que utiliza el calor para vaporizar un líquido secundario, tal como amoníaco, y expandir ese vapor a través de una turbina. El vapor puede condensarse después desechando el calor al aire o al agua superficial. Un concepto similar de usar el agua tibia en los océanos es la conversión de la energía térmica oceánica (OTEC). Este sistema comprende un motor que utiliza el agua oceánica superficial tibia como una fuente de calor y el agua oceánica profunda fría como un disipador de calor. Similar al ciclo binario geotérmico, la OTEC usa agua tibia para vaporizar un líquido, como el amoníaco, el cual después se expande a través de una turbina. El gas se condensa después con el agua oceánica profunda fría y se recicla. Para estos dos procesos, se usa un gas como el fluido de trabajo y por lo tanto tiene que usarse una turbina grande (es decir, al menos de aproximadamente 10 metros de diámetro para la turbina de vapor OTC). Esta es una limitación de diseño que puede aliviarse mediante el reemplazo del sistema de vapor de amoníaco usado comúnmente con el motor de calor osmótico de la invención. Mediante el uso del agua tibia para agotar la solución de extracción de  $\text{NH}_3\text{-CO}_2$  y el agua fría para condensar estos gases, el fluido de trabajo dirigido a través de la turbina para generar energía es en cambio un líquido. Esto es de significativo beneficio, dado que las turbinas hidráulicas son mucho más pequeñas que las turbinas diseñadas para usar gases que son de menor densidad, y son muy eficientes en la conversión de trabajo en electricidad.

Un beneficio del motor de calor osmótico de la presente invención es la capacidad de convertir exitosamente fuentes de calor de bajo nivel en energía eléctrica. La configuración del motor de calor de la invención resuelve muchos de los problemas económicos y ambientales anteriores de la PRO de salida al río debido a su configuración de lazo cerrado y al soluto de extracción reciclable. La utilización de las fuentes de calor de bajo nivel proporciona, además, una fuente de energía esencialmente libre de costos porque el costo de la energía se relaciona solamente con el costo de capital del equipamiento amortizado durante la vida del equipamiento y el mantenimiento. El calor requerido para separar los solutos de extracción de la solución por lo general se introduce a una temperatura de entre aproximadamente 35 y 250

°C. Además, la temperatura requerida para separar los solutos de extracción de la solución es proporcional a la presión y la presión por lo general se introduce a aproximadamente 0.05 hasta aproximadamente 10 atm.

#### EJEMPLO:

Se realizaron experimentos de flujo en el laboratorio para determinar la factibilidad del proceso del motor de calor osmótico de la invención. El flujo de agua debe ser alto para que la generación de energía sea eficiente. Las pruebas anteriores del flujo con membranas de ósmosis inversa mostraron que el flujo raramente excedía los valores mínimos (no más de 2-3 galones por pie cuadrado de área de membrana por día (gfd) y frecuentemente mucho menos de 1 gfd).

Los inventores investigaron una membrana disponible comercialmente la cual se adapta bien para los procesos osmóticos y encontraron que el flujo fue mucho mejor. Los datos se tomaron con la solución de extracción de  $\text{NH}_3\text{-CO}_2$  sobre la capa activa de la membrana. Una alimentación de agua desionizada se usó para simular las condiciones del motor de calor osmótico. Se evaluaron dos temperaturas: 20 °C y 40 °C, y las soluciones de alimentación y de extracción se mantuvieron a temperaturas idénticas para ambas series de pruebas. Los resultados se muestran en la Fig. 3.

Se probaron dos temperaturas en un intervalo de presiones osmóticas. Se obtuvieron flujos de más de 50 gfd en algunas pruebas, que sugieren que esta membrana particular usada es 50 veces mejor que algunas membranas probadas anteriormente, lo cual tiene un impacto significativo sobre la cantidad de membrana necesaria para producir una determinada cantidad de electricidad. Flujos más altos producen requisitos más pequeños para el área de membrana. Se hace notar que la corriente de permeado no se presurizó en estas pruebas (y no se presurizó en las investigaciones anteriores tampoco).

A partir de estos datos, pueden estimarse los datos de generación de energía mediante el modelado del proceso en Aspen HYSYS® (disponible de Aspen Technology, Burlington, Massachusetts). Utilizando diversas concentraciones de la solución de extracción en un intervalo de presurización de permeado, la cantidad de generación de energía puede calcularse mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\text{Trabajo} = (\text{Eficiencia de la turbina}) \times (\text{Presión hidráulica}) \times (\text{Volumen de flujo}) \quad (1)$$

La eficiencia de la turbina frecuentemente sobrepasa 90 % y la fuerza total de accionamiento provoca el flujo a través de la membrana. A medida que se aumenta la energía hidráulica en la corriente de permeado, el flujo disminuye, pero se establece un punto de máxima generación de energía. La Fig. 4 ilustra esta característica para un intervalo de concentraciones de la solución de extracción y muestra cómo funcionan varias concentraciones de la solución de extracción en el motor de calor osmótico de la invención sobre un intervalo de la presión hidráulica del lado del permeado. La producción de energía se modeló usando Aspen HYSYS® (disponible de Aspen Technology, Burlington, Massachusetts).

Es importante hacer notar que la producción de energía esperada de los gradientes de salinidad natural, tales como esos presentes en las interfaces del río y el agua de mar, sería mucho menor que estos resultados de la energía modelada. Con membranas estudiadas anteriormente, la salida de energía por área de membrana en PRO con agua dulce y agua de mar fue a lo sumo  $1.4 \text{ W/m}^2$ . Estos datos demuestran que el motor de calor osmótico de  $\text{NH}_3\text{-CO}_2$  de la invención, mediante el uso de esta membrana osmótica adaptada puede exceder la salida 200 veces bajo ciertas configuraciones. Dado que el área de membrana se usa, además, como la métrica para el costo de capital y porque la entrada de calor al sistema es prácticamente gratis, los valores más altos de producción de energía por área de membrana tienen una relevancia directa en el costo total de la electricidad que se produce.

Además, las proyecciones del rendimiento del OHE de amoniaco-dióxido de carbono de la invención se basaron, además, en los datos experimentales para el flujo de agua, los cálculos de eficiencia de la conversión de energía en la turbina y los sistemas de recuperación de la presión, y la modelación de los requerimientos de energía para la eliminación y reciclaje de los solutos de extracción del OHE.

Las mediciones del flujo de agua a través de membranas semipermeables orientadas en la configuración de PRO (capa de refuerzo hacia la alimentación, capa activa hacia la solución de extracción) proporcionan datos para las estimaciones del rendimiento del motor. Los datos del flujo de agua de la membrana se obtuvieron mediante el uso de una celda de membranas de flujo cruzado y los componentes asociados del sistema. Las dimensiones del canal eran de 77 mm de largo por 26 mm de ancho por 3 mm de profundidad. Los separadores de malla se insertaron dentro de ambos canales para mejorar el soporte de la membrana así como también para promover la turbulencia y la transferencia de masa. Una bomba peristáltica de velocidad factible (disponible de Masterflex de Vernon Hills, Illinois) con un cabezal de bomba doble se usó para bombear las soluciones tanto de alimentación como de extracción en un lazo cerrado. Un baño de agua de temperatura constante (disponible de Neslab de Newington, Nuevo Hampshire) se usó para mantener las temperaturas de las soluciones tanto de alimentación como de extracción. La transferencia de calor se produjo dentro del baño de agua a través de las espiras del intercambiador de calor de acero inoxidable en línea las cuales se sumergieron en el baño con agitación. La solución de extracción reposó en una pesa (disponible de Denver Instruments

de Denver, Colorado) y se midieron los cambios del peso con el paso del tiempo para determinar el flujo de agua del permeado. La membrana se colocó en la celda de manera que la solución de extracción estaba contra la capa activa y la solución de alimentación estaba contra la capa de soporte.

5 La membrana usada para adquirir los datos de flujo se diseñó para desalinización por ósmosis directa y se obtuvo de Hydration Technologies, Inc. (Albany, Oregón). La composición química de la membrana está protegida comercialmente, pero se cree que contiene polímeros de acetato de celulosa. La estructura es asimétrica con una capa de separación soportada por una estructura de soporte relativamente delgada (es decir, de menos de aproximadamente 10 50  $\mu\text{m}$ ). El soporte adicional se proporciona por una malla de poliéster incorporada dentro de la capa polimérica de soporte.

El flujo de agua osmótico se determinó para un intervalo de las concentraciones de la solución de extracción. La solución de extracción se realizó mediante la mezcla de sal de bicarbonato de amonio ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) con hidróxido amónico ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), formando una solución compleja de sales amónicas, compuesta de bicarbonato amónico, carbonato amónico y carbamato amónico, siendo este último el más abundante en soluciones concentradas. La cantidad de  $\text{NH}_4\text{OH}$  añadida se varió en dependencia de la concentración de la solución de extracción y de la temperatura a la que se iba a usar. La cantidad de  $\text{NH}_4\text{OH}$  se redujo al mínimo para minimizar la concentración de amoniaco desionizado en la solución de extracción. Las propiedades de las soluciones de extracción usadas en el modelado de la OHE, que incluyen la presión osmótica, densidad, viscosidad y pH, se obtuvieron con Aspen HYSYS® (disponible de Aspen 15 Technology, Burlington, Massachusetts), junto con un paquete de propiedades de electrólitos de OLI Systems, Inc. (Morris Plains, Nueva Jersey).

Los datos experimentales del flujo de agua de la membrana se usaron para calcular los coeficientes de ajuste de transferencia (aparente) de masa para las predicciones de la polarización por concentración externa (ECP) en la interfaz 25 entre la membrana y la solución de extracción concentrada usada para impulsar el flujo de agua del motor. Los efectos de la ECP para una solución de extracción concentrada en un sistema de membrana de OHE se predicen con el coeficiente de ajuste de transferencia de masa y en base a la teoría de películas con los efectos de la ECP altamente concentrada calculados en base a la extrapolación a partir de los datos experimentales. Este ajuste y extrapolación del modelo se considera necesario a la luz de la significación esperada de los efectos de la ECP con el sistema de 30 membrana del OHE y la insuficiencia de la teoría tradicional de películas para describir los fenómenos de transferencia de masa en los fluidos no ideales de la solución altamente concentrada. Los flujos de membrana predichos mediante el uso de la eficiencia ajustada se encontraron que se correlacionaban bien con el rendimiento observado del flujo de agua, dentro del intervalo de los datos experimentales.

35 Las mediciones del flujo de agua bajo condiciones no presurizadas se supone que predicen el flujo en el sistema de OHE presurizado de la invención, que sigue la ecuación aplicable para PRO bajo condiciones de presiones osmótica e hidráulica diferentes:

$$40 \quad J_w = A(\sigma\Delta\pi_m - \Delta P) \quad (2)$$

Aquí, A es el coeficiente de permeabilidad del agua,  $\sigma$  el coeficiente de reflexión,  $\Delta\pi_m$  la diferencia de las presiones osmóticas a través de la membrana entre la solución de extracción y de alimentación en la interfaz de separación (es decir, la superficie de la capa activa de la membrana), y  $\Delta P$  es la diferencia de la presión hidráulica entre el lado de la solución de extracción y el fluido de trabajo.  $\Delta\pi_m$  se calcula a partir de la presión osmótica neta de la solución de 45 extracción después de considerar los efectos de la ECP como se discutió anteriormente.

Se supuso que  $\sigma = 1$  en todos los cálculos debido al rechazo relativamente alto de la membrana de FO usada. Además, el coeficiente de permeabilidad del agua A se supone que es independiente de la presión hidráulica aplicada, que implica la compactación insignificante de la membrana. La selección de la membrana, las presiones de operación, y la 50 temperatura del sistema incluye la exactitud de las predicciones en base a estas suposiciones.

La energía producida por el OHE (W) es una función de la cantidad de agua que se mueve a través de su turbina por unidad de tiempo (V), la caída de presión en esa turbina la cual es igual a la presión hidráulica aplicada en el lado de la solución de extracción ( $\Delta P$ ), y la eficiencia de la turbina (E):

$$55 \quad W = EV\Delta P \quad (3)$$

La eficiencia de la turbina E es típicamente mayor que 90 %. La eficiencia del intercambiador de presión usado para mantener la presurización en estado estacionario de la solución de extracción es típicamente mayor que 95%. La 60 eficiencia combinada de estos dos componentes se aproxima, en el esfuerzo de modelación descrito en la presente descripción, a una eficiencia general de 90 % para las proyecciones de producción de energía, capturada en el valor de 0.90 para E en la Ecuación 2 anteriormente. El volumen que fluye a través de la turbina por unidad de tiempo (V) es igual al producto del flujo de agua a través de las membranas del OHE ( $J_w$ ) y el área superficial total de la membrana. Este flujo es una función de las presiones tanto hidráulica como osmótica del sistema, como se mostró por la Ecuación 1 65 anteriormente. El aumento de la presión hidráulica con relación a la presión osmótica aumenta la salida de energía por



unidad de volumen del agua a través de la turbina, pero también disminuye el volumen total de agua por la disminución del flujo de agua de la membrana. La disminución de la presión hidráulica tendrá el efecto inverso.

La eficiencia térmica se calcula mediante la medición de la cantidad de energía producida con relación a la cantidad de calor usado (para la separación y recuperación de la solución de extracción). Existen dos medidas de eficiencia que pueden considerarse para evaluar el rendimiento de un motor: la eficiencia térmica y la eficiencia de Carnot. La eficiencia térmica es simplemente la relación de la salida de energía del motor sobre la entrada de calor. La eficiencia de Carnot es una medida de la eficiencia de un motor con relación a la de un motor de Carnot, uno que produzca la máxima cantidad teórica de trabajo a partir de un flujo de calor dado, en base a un proceso perfectamente reversible.

El componente de la "cantidad de calor" de la eficiencia del motor puede calcularse en base al calor requerido de la columna de destilación usada para separar el amoníaco y el dióxido de carbono de la solución de extracción del diluido, que produce una solución de extracción nuevamente concentrada y el fluido de trabajo desionizado. El calor requerido por la columna se modeló con Aspen HYSYS® (disponible de Aspen Technology, Burlington, Massachusetts) junto con un paquete de propiedades de electrolitos de OLI Systems, Inc. (Morris Plains, Nueva Jersey), según los procedimientos usados para estimar las demandas de energía de la desalinización por ósmosis directa.

La eficiencia de un motor de Carnot ( $\eta$ ) viene dada por

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (4)$$

donde  $T_H$  es la temperatura absoluta del calor entregado al motor (a partir de la combustión de combustible, por ejemplo) y  $T_L$  es la temperatura absoluta a la que el calor se rechaza al medio ambiente. La medición de la eficiencia del OHE contra la eficiencia de un motor de Carnot establece cuán eficiente es el OHE con relación a la cantidad de calor que usa. Una planta de energía geotérmica que usa calor de 200 °C, por ejemplo, que obtiene una eficiencia térmica de 20 %, no sería, según la medida de eficiencia térmica, una planta muy eficiente. La eficiencia de Carnot de tal motor, sin embargo, sería de 55 %, aproximadamente igual a la eficiencia de Carnot de una operación de una planta de energía alimentada con carbón a 537°C. Este es un método de comparación particularmente útil entre las tecnologías de motores térmicos cuando se consideran fuentes de calor tan bajo como 20 °C por encima de las temperaturas ambientales, donde las máximas eficiencias térmicas teóricas son muy bajas.

A medida que aumenta la diferencia en la presión osmótica entre dos soluciones, también aumentará el flujo a través de una membrana semipermeable que las separa a las dos. Esta relación es no lineal, debido a los efectos de la polarización por concentración en la superficie de la membrana. En el modo PRO (la solución de extracción en el lado de la capa activa de la membrana) con agua desionizada como la alimentación, se espera que se produzca solamente la polarización por concentración externa, bajo la suposición de muy alto rechazo de las sales por la membrana. La Fig. 3 ilustra la relación entre el flujo de agua y la concentración de la solución de extracción para la membrana.

El rendimiento del flujo de agua osmótico de la membrana se evaluó mediante el uso de una solución de extracción de  $\text{NH}_3/\text{CO}_2$  despresurizada con agua desionizada como la corriente de alimentación, con soluciones isotérmicas de alimentación y de extracción. La fuerza motriz se calcula en base a la presión osmótica neta de la solución de extracción. Las líneas discontinuas indican la permeabilidad hidráulica del agua pura determinada a partir de pruebas de ósmosis inversa con la misma membrana. Las diferencias entre estas líneas y los datos experimentales se deben a la polarización por concentración externa.

Los datos se muestran para 20 y 40 °C, con las soluciones de alimentación y extracción en cada uno de los casos isotérmicos. El flujo se muestra con relación a las presiones osmóticas de las soluciones de extracción. Las temperaturas más altas conducen a flujos de agua más altos debido a los efectos de la temperatura sobre la permeabilidad al agua de la membrana y la difusividad de los solutos extraídos. Con la membrana de FO que funciona en el modo PRO con una alimentación de agua desionizada, el flujo de agua sobrepasa los 25  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-s}$  (o 50 galones por pie cuadrado de membrana por día, GFD). La relación no lineal que se muestra se debe a la ECP, provocada por la dilución de la solución de extracción en la superficie de la membrana en el lado del permeado de la membrana. Estos datos experimentales de flujo se usan para calcular la salida de energía del OHE como se describe más abajo.

Un criterio para optimizar el OHE es seleccionar presiones hidráulicas y osmóticas que produzcan la más alta salida de energía por área de membrana, o la más alta "densidad de energía" de la membrana. La densidad de energía se calcula en base al flujo de agua de la membrana, la presión hidráulica de la solución de extracción, y los efectos anticipados de la ECP en el sistema de membrana de OHE. Los efectos de la ECP se calcularon mediante el uso de un coeficiente de ajuste de transferencia de masa de  $1.78 \times 10^{-5}$  m/s, determinado a través de las mediciones experimentales del flujo en el modo PRO. La eficiencia combinada de la turbina hidráulica y el dispositivo de recuperación de la presión se supuso que era 90 %. La relación entre las presiones osmótica e hidráulica en el OHE, con relación a la densidad de energía de la membrana se muestra en la Fig. 4. Cada curva corresponde a una concentración fija de la concentración de la solución de extracción amoníaco-dióxido de carbono.

La modelación indicó que la máxima densidad de energía de la membrana se logra cuando la presión hidráulica es

aproximadamente 50 % de la presión osmótica. Para un OHE con una presión hidráulica de 10.13 MPa (100 atm), la densidad de energía que se proporciona por el uso de una solución de extracción 4.6 M que produce 19.16 MPa (197 atm) de presión osmótica es aproximadamente 170 W/m<sup>2</sup>. Esta es muy alta si se compara con las densidades de energía esperadas de las plantas de energía de PRO de salinidad de río y agua de mar, las cuales están por lo general en el intervalo por debajo de 4 W/m<sup>2</sup>.

La densidad de energía puede aumentarse más mediante el aumento de la velocidad del flujo cruzado de la corriente de la solución de extracción (para disminuir los efectos de la ECP) o de la presión hidráulica del sistema de membrana de OHE. La modelación de un OHE con significativamente mayores velocidades del flujo cruzado (5 m/s en un canal de flujo de 0.05 cm de alto), indica que las densidades de energía del OHE se aumentarían en aproximadamente 61 % por encima de esas de un sistema de membrana con la dinámica de fluidos de la celda de prueba usada en el estudio descrito en la presente descripción (0.46 m/s en un canal de 0.3 cm de alto). Para un OHE que funciona a 10.13 MPa (100 atm) de presión hidráulica, la máxima densidad de energía sería de aproximadamente 274 W/m<sup>2</sup> en este escenario.

La modelación de un OHE con una presión hidráulica de funcionamiento de 20.26 MPa (200 atm) indica que las densidades de energía se aumentarían en un 47 % adicional por encima de esas de un sistema de 10.13 MPa (100 atm). La mayor velocidad del flujo cruzado, sin embargo, resultará en el consumo de energía adicional, y la mayor presión hidráulica requerirá componentes del proceso más costosos. Estas condiciones de funcionamiento serán necesariamente factores en la optimización del proceso, que se equilibran contra los factores relacionados del consumo de energía para el bombeo de los fluidos del proceso y del capital de equipos y de los costos de reemplazo.

La eficiencia de Carnot del OHE se modeló sobre un intervalo de presiones osmótica e hidráulica. En el cálculo de la eficiencia térmica del motor, el calor y la electricidad requeridos para el proceso de separación y reciclaje de la solución de extracción se comparan con la producción eléctrica de la turbina generadora de energía del OHE para la combinación de las presiones osmótica e hidráulica examinadas. Debido a que la energía eléctrica necesaria para la separación y reciclaje del soluto de extracción es insignificante, en la práctica la eficiencia térmica es la relación entre la energía eléctrica producida por el OHE y la energía térmica requerida para la separación del soluto de extracción. Esta eficiencia se compara con la eficiencia térmica de un motor de Carnot que funciona con las mismas corrientes de calor de alta y baja temperaturas, que da una medida del "porcentaje de eficiencia de Carnot" del rendimiento del OHE.

Para determinar el calor y la electricidad requeridos para el proceso de remoción y reciclaje del soluto de extracción, se especifica una solución de extracción de concentración suficiente para producir la presión osmótica deseada en un modelo de simulación química en HYSYS®. Esta corriente de la solución se dirige hacia una columna de destilación con características apropiadas para la remoción. Un ejemplo de tal modelo especifica una única columna de destilación, que efectúa la separación de los solutos de extracción a partir de una corriente de la solución de extracción 6 M (de base CO<sub>2</sub>) (que genera 31.94 MPa (315.26 atm) de presión osmótica en el sistema de membrana de OHE, que contiene empaque estructurado de 2.35 m (7.7 pies) de altura (30 etapas teóricas) suministrada con calor a 50 °C. Una columna de este tipo funciona a una presión y temperatura en el fondo de 10.62 kPa (0.1048 atm) y 46.96 °C (dado un ΔT de 3 °C en el intercambiador de calor del rehevador), y una presión y temperatura en la parte superior de 10.54 kPa (0.1040 atm) y 35.55 °C. La corriente alimentada a la parte superior de la columna se precalienta a 32 °C con un requerimiento de energía de 3196.8 MJ/m<sup>3</sup> (por m<sup>3</sup> de fluido de trabajo producido). El calor requerido en la columna es 3454.6 MJ/m<sup>3</sup>, suministrado al rehevador. El calentamiento complementario requerido para mantener todas las corrientes a las temperaturas especificadas es 385.7 MJ/m<sup>3</sup>, para un calor requerido total de 7037.1 MJ/m<sup>3</sup>. El requerimiento eléctrico para el bombeo de líquidos en el proceso de separación es relativamente insignificante (0.48 MJ/m<sup>3</sup>). Un sumario de los requerimientos de calor y eléctricos requeridos para la separación del soluto de extracción en las concentraciones típicas usadas en las simulaciones se proporciona en la Tabla 1. Esta Tabla proporciona también algunas propiedades de la solución de extracción que son relevantes para modelar el rendimiento OHE.

Concentración del soluto de extracción (M)	Presión osmótica (atm)	Relación NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub>	Calor requerido (MJ/m <sup>3</sup> )	Requerimiento eléctrico (MJ/m <sup>3</sup> )
1	43.7	1.1	358.0	0.12
2	84.4	1.2	593.4	0.13
3	120.1	1.2	865.7	0.16
4	157.8	1.3	1319.0	0.19
5	229.6	1.6	2847.7	0.26
6	319.7	1.8	7037.1	0.48

La eficiencia global de Carnot del OHE se calculó en base a la modelación como se describió anteriormente, sobre un intervalo de las temperaturas del calor suministrado. Sobre una variedad de temperaturas las eficiencias fueron significativamente constantes. En la Fig. 5, se muestran las eficiencias de Carnot para los OHE que funcionan con calor de 50 °C, sobre un intervalo de presiones osmótica e hidráulica en el sistema de membrana de OHE. Para cada combinación de presiones, las temperaturas se mantuvieron constantes, con una temperatura alta, o temperatura de la energía suministrada de 50 °C y una temperatura baja, o temperatura del medio ambiente de 25 °C.

La Fig. 5 representa la eficiencia del motor del OHE como un porcentaje de la eficiencia del motor de Carnot, con relación a la diferencia entre las presiones hidráulicas y osmóticas de la solución de extracción. Para una alta temperatura de 50 °C y una baja temperatura de 25 °C, el porcentaje de la máxima eficiencia teórica del motor (Carnot) alcanza un máximo de aproximadamente 16 % a medida que la fuerza neta de accionamiento ( $\Delta\pi - \Delta P$ ) se acerca a cero. La presión osmótica  $\Delta\pi$  se basa en la presión osmótica neta de la solución de extracción.

Los resultados indican que la más alta eficiencia del motor se obtiene cuando la diferencia entre las presiones osmótica e hidráulica se acerca a cero. Dadas iguales presiones osmótica e hidráulica en el equilibrio en una condición de flujo cero, los aumentos de la presión osmótica aumentarán el flujo de agua de la membrana, que aumenta así la cantidad de energía producida por la turbina OHE. Los aumentos de la presión osmótica se logran mediante el aumento de la concentración de la solución de extracción. Las soluciones de extracción de más alta concentración requieren más energía para la remoción y reciclaje del soluto en forma de calor suministrado. Por lo tanto, a medida que se aumenta la presión osmótica, aumentan concurrentemente la producción de energía, el flujo de agua de la membrana, y el requisito de calor requerido por el sistema de reciclaje del soluto.

La columna de destilación usada para el sistema de reciclaje del soluto sin embargo es ineficiente en su remoción del  $\text{NH}_3$  y del  $\text{CO}_2$  de la solución de extracción diluida. Un poco de vapor de agua también se remueve, lo que requiere el calor que pueda no convertirse para la producción de energía. A medida que se aumenta la concentración de la solución de extracción, aumenta también la cantidad de vapor de agua creado en la columna de destilación, y esta ineficiencia inherente de la separación resulta en la disminución de la eficiencia global del OHE. Este aumento en la presión osmótica resulta sin embargo en mayor flujo de agua, lo cual beneficia el funcionamiento del OHE a través de la mayor densidad de energía de la membrana. Las mayores densidades de energía de la membrana requieren menos área de membrana para una capacidad de energía dada y así menos costo de la membrana. Esto representa un compromiso entre el costo de capital de la membrana y la eficiencia del motor, el cual debe optimizarse en el diseño de un sistema OHE.

Como se observa de la discusión anterior, aunque la eficiencia global del motor es muy baja, que alcanza un máximo de 16 % de la eficiencia de Carnot, y que posiblemente funciona a una eficiencia de 5-10 %, la salida de energía por área de membrana puede ser bastante alta, de más de 250  $\text{W/m}^2$  de área de membrana. Si el OHE usa fuentes de energía térmica en el intervalo de 40-100 °C, el costo de la entrada de energía al motor puede resultar insignificante. Una consideración importante sería los costos de capital y de mano de obra del proceso y sus impactos en el costo de la electricidad producida.

El uso del motor de calor osmótico de amoníaco y dióxido de carbono de la invención permite la producción de energía a partir de diversas fuentes de energía tales como el calor a partir de las corrientes de rechazo de las plantas de energía existentes, las fuentes de calor geotérmico de baja temperatura improductivas de cualquier otra manera, la energía térmica solar de baja concentración, el calor (sin combustión) de la biomasa y la conversión de la energía térmica oceánica, entre otros. En todos estos casos el proceso de la invención produce energía que es renovable y libre de carbono.

Aunque la invención se ha descrito anteriormente con referencia a modalidades específicas de la misma, es evidente que pueden hacerse muchos cambios, modificaciones, y variaciones sin apartarse del alcance de las reivindicaciones. En consecuencia, se pretenden abarcar todos estos cambios, modificaciones, y variaciones que caen dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

55

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para generar energía con el uso de un motor de calor osmótico de amoníaco-dióxido de carbono, que comprende las etapas de:
- 10 a) presurizar una solución de extracción concentrada hasta una presión hidráulica inferior que su presión osmótica en un primer lado de una membrana semipermeable, en donde la solución de extracción concentrada comprende amoníaco y dióxido de carbono;
- 15 b) introducir un fluido de trabajo diluido en el lado opuesto de dicha membrana semipermeable, en donde el fluido de trabajo diluido comprende agua casi desionizada;
- 20 c) hacer que una porción del fluido de trabajo diluido fluya a través de la membrana semipermeable en la solución de extracción presurizada para crear un flujo de agua que expande el volumen de la solución de extracción;
- d) inducir el flujo del volumen expandido de la solución de extracción a través de una turbina para producir energía;
- e) separar térmicamente el amoníaco y dióxido de carbono de la solución de extracción, y
- f) reciclar el amoníaco y dióxido de carbono, produciendo de ese modo nuevas corrientes de la solución de extracción y del fluido de trabajo para reutilizarlas en el sistema.
- 25 2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la solución de extracción concentrada tiene una relación de amoníaco a dióxido de carbono de entre aproximadamente 1:1 a 2.5:1.
- 30 3. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la solución de extracción tiene una concentración de entre 0.1 y 12 molar.
4. El método de acuerdo con la reivindicación 3, en donde la solución de extracción tiene una concentración de entre aproximadamente 3 a aproximadamente 6 molar.
- 35 5. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el flujo de agua es al menos aproximadamente  $25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-s}$ .
6. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el calor se introduce a una temperatura de entre aproximadamente 35 y 250 °C.
- 40 7. El método de acuerdo con la reivindicación 6, en donde el calor es una fuente de calor de bajo nivel seleccionada a partir del grupo que consiste de calor residual de los procesos de fabricación de metales, fabricación de vidrio, refinación de petróleo y generación de energía termoeléctrica, fuentes de calor geotérmico, y conversión de la energía térmica oceánica.
- 45 8. El método de acuerdo con la reivindicación 7, en donde la temperatura requerida para separar los solutos de extracción de la solución es proporcional a la presión y la presión se introduce a aproximadamente 0.05 hasta aproximadamente 10 atm.
- 50 9. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la salida de energía por área de membrana es al menos de aproximadamente  $150 \text{ W/m}^2$ , preferentemente, la salida de energía por área de membrana es al menos de aproximadamente  $250 \text{ W/m}^2$ .
- 55 10. Un motor de calor osmótico, que comprende:
- una membrana semipermeable que tiene un primer lado y un lado opuesto;
- una fuente de un fluido de trabajo diluido que se conecta por fluidos al lado opuesto de la membrana;
- 60 una fuente de una solución de extracción concentrada que comprende amoníaco y dióxido de carbono se conecta por fluidos al primer lado de la membrana para crear una presión osmótica en el primer lado del sistema de membrana para provocar un flujo a través de la membrana;
- un intercambiador de presión acoplado al primer lado de la membrana para presurizar la solución de extracción concentrada hasta una presión hidráulica menor que la presión osmótica de la solución de extracción concentrada;
- 65

una turbina conectada por fluidos al sistema de membrana aguas abajo del primer lado de la membrana;

un sistema de reciclaje conectado por fluidos al primer lado y al lado opuesto de la membrana;

- 5 caracterizado porque el motor comprende, además, una columna de destilación conectada por fluidos aguas abajo de la turbina para separar térmicamente el amoníaco y el dióxido de carbono de la solución de extracción diluida.
- 10 11. El motor de calor osmótico de acuerdo con la reivindicación 10, en donde la solución de extracción concentrada tiene una relación de amoníaco a dióxido de carbono de entre 1 a 1 y 2.5 a 1.
12. El motor de calor osmótico de acuerdo con la reivindicación 10, en donde la solución de extracción concentrada tiene una concentración de entre 0.1 molar y 12 molar.
- 15 13. El motor de calor osmótico de acuerdo con la reivindicación 12, en donde la solución de extracción concentrada tiene una concentración de entre 3 molar y 6 molar.
- 20 14. El motor de calor osmótico de acuerdo con la reivindicación 10, en donde la salida de energía por área de membrana del motor de calor osmótico es al menos  $150 \text{ W/m}^2$ , preferentemente, la salida de energía por área de membrana es al menos de aproximadamente  $250 \text{ W/m}^2$ .
- 25 15. El motor de calor osmótico de la reivindicación 10, en donde el intercambiador de presión presuriza la solución de extracción concentrada hasta una presión hidráulica de aproximadamente 50 % de la presión osmótica de la solución de extracción concentrada.

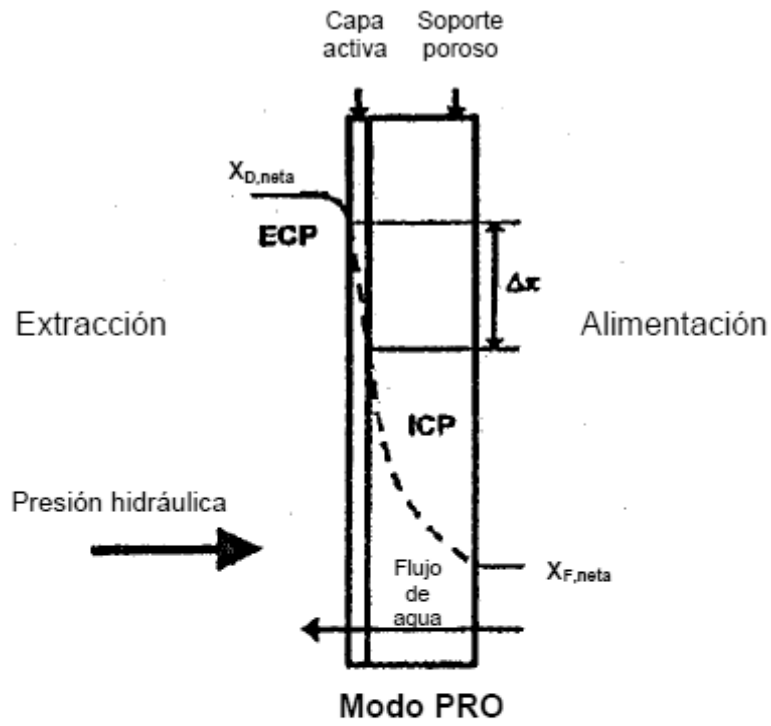
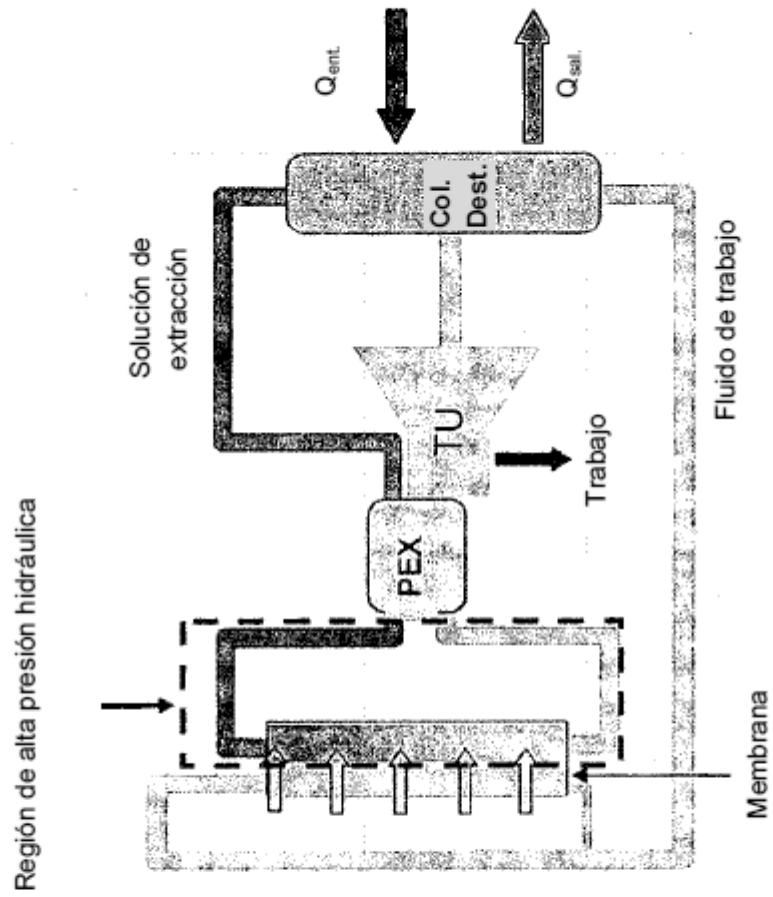


Figura 1

Figura 2



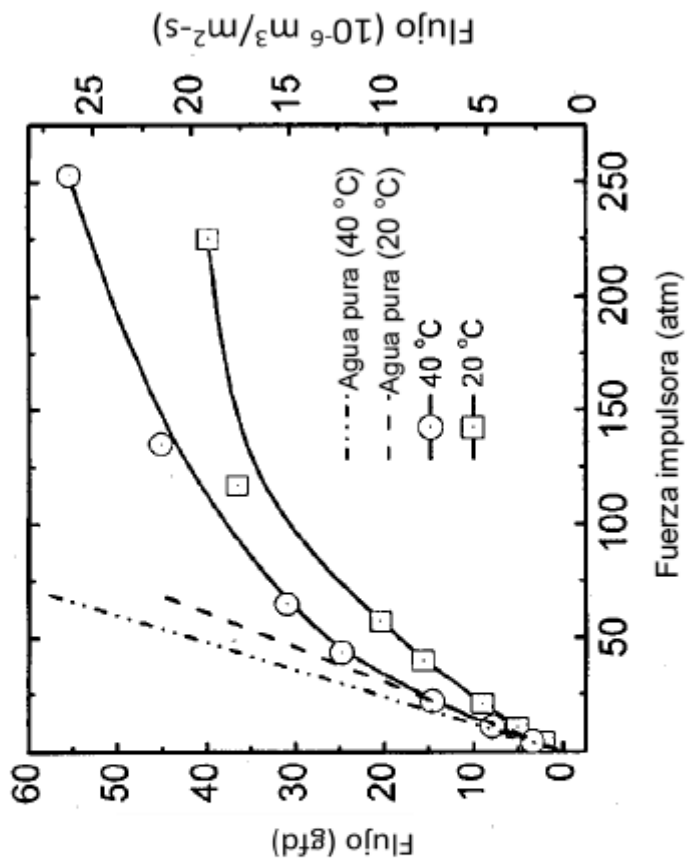


Figura 3



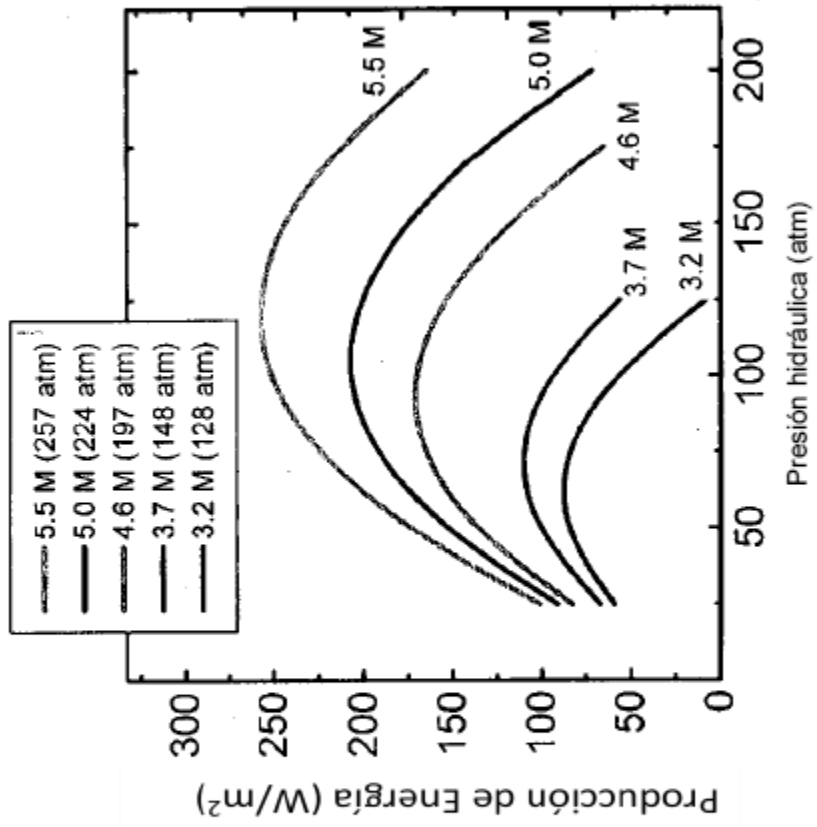


Figura 4

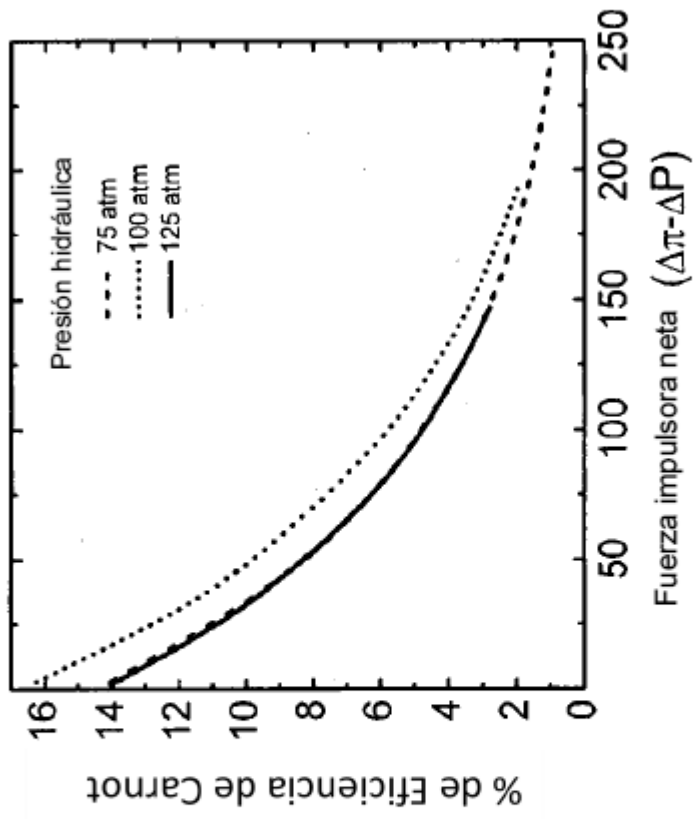


Figura 5