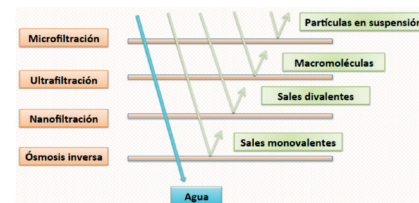


Reutilización de elementos de ósmosis inversa de los procesos de desalación

Reuse of reverse osmosis elements of the desalination processes



Federico León-Zerpa¹, Baltasar Peñate-Suárez², Javier Roo-Filgueira³ y Jenifer Vaswani¹

¹ Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Dpto. de Ingeniería de Procesos. Campus Universitario de Tafira - 35017 Las Palmas de Gran Canaria (España).

² Instituto Tecnológico de Canarias. Dpto. de Agua. Playa de Pozo Izquierdo, s/n - 35119 Santa Lucía. Las Palmas (España).

³ Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la información. Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo. Gobierno de Canarias. Calle León y Castillo, 200 - 35071 Las Palmas de Gran Canaria (España).

DOI: <https://doi.org/10.6036/10061> | Recibido: 14/ene/2021 • Inicio Evaluación: 26/ene/2021 • Aceptado: 16/mar/2021

To cite this article: LEÓN-ZERPA, Federico; PEÑATE-SUÁREZ, Baltasar; ROO-FILGUEIRA, Javier; VASWANI, Jenifer. REUSE OF REVERSE OSMOSIS ELEMENTS OF THE DESALINATION PROCESSES. DYNA. July 2021, vol. 96, no. 4, p. 429-434. DOI: <https://doi.org/10.6036/10061>

FINANCIACIÓN

Este trabajo ha sido co-financiado por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información - Gobierno de Canarias (ACIISI) a través del Proyecto DESAL+ - Plataforma macaronésica para el incremento de la excelencia en materia de I+D en desalación de agua y del conocimiento del nexo agua desalada-energía (MAC/1.1a/094), cofinanciado por fondos FEDER en el marco del programa INTERREG MAC (2014-2020).

ABSTRACT

• This paper is based on the study for the evaluation of the processes of reuse and recycling of reverse osmosis components and membranes in the Canary Islands and Macaronesia, within the DESAL+ project and in the framework of the DESAL+ LIVING LAB platform, coordinated by the Canary Islands Technological Institute (ITC) and the Canary Islands Agency for Research, Innovation and Information Society (ACIISI), with the support of the Interreg-MAC Programme.

Reverse osmosis membranes could be reused in the same or another desalination plant by replacing the membranes in the first, dirtier positions with those in the last, less damaged positions. Also, by changing the best first-stage membranes to the second and vice versa, the useful life of these membranes could be extended through chemical cleaning and a second life could be given in tertiary treatment plants, reuse in industrial processes where they use special reverse osmosis membranes and degrade rapidly, in processes with leachate from landfill waste and also an interesting option is the oxidation of reverse osmosis elements to obtain nano-filtration, ultrafiltration or micro-filtration membranes for the removal of physical dirt.

The main categories of thermal processing recycling commonly used in industry include incineration and pyrolysis to produce energy, gas and fuel. These processes can be applied to mixed plastic waste, such as the combination of materials used in the manufacture of reverse osmosis membranes. The recycling of reverse osmosis elements from desalination plants is shown as an opportunity, nowadays existing pioneering initiatives in Europe.

Energy recovery, via incineration, is feasible but is not considered in accordance with the environmental, social and political problems that this may generate. However, the recycling of the reverse osmosis elements via pyrolytic industry for fuel production can be centralized in a new industry already planned in the Canary Islands and all the osmosis membranes that are obsolete can be sent there. This is a technically and economically viable business opportunity with a promising future in today's recycling market as studied in the paper.

• **Keywords:** Reciclado, revalorización, residuos industriales, reúso de membranas.

RESUMEN

Este artículo se basa sobre el estudio para la evaluación de procesos de reutilización y reciclado de componentes y membranas de ósmosis inversa en Canarias y la Macaronesia, dentro del proyecto DESAL+ y en el marco de la plataforma DESAL+ LIVING LAB, coordinada por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) y por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACIISI), con el soporte del Programa Interreg-MAC.

Se podrían reusar membranas de ósmosis inversa en la misma u otra planta desaladora reemplazando las membranas en primeras posiciones más sucias por las de últimas posiciones menos dañadas, también cambiando las mejores membranas de primera etapa a la segunda y viceversa, se podría alargar la vida útil de estas membranas mediante limpiezas químicas y dar una segunda vida en terciarios de depuradoras, reutilizar en procesos industriales donde utilizan membranas de ósmosis inversa especiales y se degradan rápidamente, en procesos con lixiviados procedentes de las basuras de los vertederos y también una opción interesante es la oxidación de elementos de ósmosis inversa para obtener membranas de nanofiltración, ultrafiltración o microfiltración para eliminación de suciedad física.

En cuanto a las principales categorías de reciclaje por procesamiento térmico utilizadas comúnmente en la industria incluyen la incineración y la pirólisis para producir energía, gas y combustible. Estos procesos pueden aplicarse a los residuos plásticos mixtos, como es la combinación de materiales utilizados en la fabricación de membranas de ósmosis inversa. Se muestra como una oportunidad el reciclado de elementos de ósmosis inversa de las plantas desaladoras, existiendo ya iniciativas pioneras en Europa.

La valorización energética, vía incineración, es factible pero no se considera de acuerdo con los problemas medioambientales, sociales y políticos que ello puede generar. Sin embargo, el reciclado de los elementos de ósmosis inversa vía industria pirolítica para producción de combustibles se puede centralizar en una nueva industria ya proyectada en Canarias y enviar allí todas las membranas de ósmosis que estén obsoletas. Se trata de una oportunidad de negocio viable tanto técnica como económicamente y con un futuro prometedor en el mercado actual del reciclaje como se ha estudiado en el artículo.

Palabras clave: Reciclado, revalorización, residuos industriales, reúso de membranas.

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se realiza un estudio de la evaluación de procesos para incrementar la vida útil y potencial reutilización de componentes y membranas de ósmosis inversa. Esto se desarrolla especialmente en Canarias y también en todo el espacio de cooperación de la Macaronesia. Se abordan soluciones contrastadas para el reúso de membranas en terciarios de depuradora o como filtros en procesos industriales.

Se plantean soluciones de reúso del vertido o subproductos de otros procesos para los componentes. Se obtienen resultados para incrementar la vida útil de los elementos, así como se plantean al sector residuos o industrial la existencia de subproductos que abran nuevas oportunidades. Se realiza un diagnóstico cualitativo y cuantitativo de las membranas generadas especialmente en Canarias y en la Macaronesia en general, materiales, periodicidad en el reemplazo de elementos de ósmosis inversa, etc.

Este estudio está relacionado con la economía circular y la economía azul, como intersección de los aspectos ambientales, la eficiencia del uso de los recursos materiales, económicos y sociales como motores de crecimiento e innovación para un desarrollo económico sostenible [1-3].

Conseguir potabilizar el agua del mar es una de las posibles soluciones a la escasez de agua potable. Mediante la desalinización del agua del mar se obtiene agua dulce apta para el abastecimiento y el regadío [4-6].

La desalación ha permitido localizar a Canarias en el mapa tecnológico mundial de la producción industrial de agua potable, convirtiéndola en un gran laboratorio con la ejecución de plantas

piloto a gran escala. Esto desarrolló un amplio espectro las tecnologías de desalación existentes durante años [3-6].

El crecimiento de la demanda de agua y la imposibilidad de forzar más el uso de los recursos naturales obliga al desarrollo de la desalación de aguas en particular en Canarias y en general en la Macaronesia. Esto se produce para cubrir las necesidades de agua de la población, el turismo, la industria y la agricultura [6].

En la actualidad, la desalación de aguas en Canarias en particular y en la Macaronesia en general nos permite la reutilización de elementos de ósmosis inversa de los procesos de desalación de aguas. De esta forma se puede ayudar a mejorar la economía azul de estas regiones y optimizarla [4-6]. En la tabla 1 se muestran las plantas desaladoras con caudales $\geq 5000 \text{ m}^3/\text{d}$ de Canarias.

2. ACCIONES TÉCNICAS A LLEVAR A CABO

2.1. REÚSO DE ELEMENTOS DE ÓSMOSIS INVERSA

Se destaca la importancia de la reutilización de membranas en esta zona de estudio por la alta producción de residuos de éstas que terminan en vertedero y que supone un coste. En este sentido se han investigado las acciones siguientes para la reutilización de las membranas dando una segunda vida a las mismas:

- En plantas desaladoras con dos etapas, debido al ensuciamiento de las membranas de la primera etapa frente a las de segunda etapa, se propone reemplazarlas entre sí antes de tirarlas y previa limpieza de éstas. De esta manera se podrían reutilizar membranas y darles una segunda vida en la propia planta.
- Las membranas de ósmosis inversa de agua salobre también pueden tener una segunda vida en terciarios de depuradoras que no requieran una calidad muy exigente de permeado para regadío. Esto se acentúa sobre todo si son membranas de bajo ensuciamiento o con un espaciador grande, ya que el agua procedente de la depuradora al terciario normalmente es más sucia que el agua de una instalación de pozo salobre. Ésta última es la forma más común de captación de este tipo de agua en Canarias en particular y en la Macaronesia en general.

Por ello, las membranas de la planta de agua salobre pueden haber sufrido precipitación de sales sobre todo en las situadas en las últimas posiciones de la segunda o tercera etapa. De todas formas, se pueden seleccionar las mejores y después de una limpieza química proponerlas para reutilizar en un terciario de depuradora. En estos terciarios el problema más que la precipitación de sales puede ser la suciedad del agua. Finalmente se terminarán taponando las membranas, pero después de una segunda vida y haber sido explotadas al 100%.

Además, el agua del terciario de ósmosis inversa será para regadío o devolver al mar. No puede ser para agua de abasto porque la ley no lo permite, al contrario

Denominación	Producción (m³/d)	Consumo (kWh/m³)	Isla
Lanzarote III 1	10000	3,50	Lanzarote
Lanzarote III 2	5000	3,50	Lanzarote
Lanzarote III 3	5000	3,50	Lanzarote
Lanzarote IV	20000	3,04	Lanzarote
Lanzarote V	18000	2,61	Lanzarote
Aguas de La Oliva	9000	3,04	Fuerteventura
Consorcio de Aguas	36500	3,50	Fuerteventura
Arucas-Moya I	10000	3,50	Gran Canaria
Gáldar II	7000	3,04	Gran Canaria
Agragua	15000	3,50	Gran Canaria
Guía I	5000	3,50	Gran Canaria
Guía II	5000	2,61	Gran Canaria
Félix Santiago Melián	5000	2,61	Gran Canaria
Las Palmas III	65000	3,50	Gran Canaria
Las Palmas IV	15000	2,61	Gran Canaria
Bonny	8000	2,61	Gran Canaria
Maspalomas I Mar	14500	3,50	Gran Canaria
Maspalomas II	25200	3,04	Gran Canaria
Ayto. San Nicolas	5000	3,04	Gran Canaria
Agricultores de la Aldea	5400	3,04	Gran Canaria
Sureste III	8000	3,50	Gran Canaria
Salinetas	16000	3,50	Gran Canaria
Adeje Arona	30000	3,04	Tenerife
La Caleta (Ayto. Adeje)	10000	3,04	Tenerife
UTE Tenerife Oeste	14000	3,04	Tenerife
UTE Desalinizadora de Granadilla	14000	3,50	Tenerife
Santa Cruz I	20000	3,04	Tenerife

Tabla 1. Plantas desalinizadoras de agua de mar de Canarias [3-6]

que en otros países como Singapur. Por tanto, no se corre el riesgo de que las membranas reutilizadas puedan tener algún tipo de fuga que haga que la calidad del agua empeore y dañe a las personas.

- Hay algunos procesos industriales donde utilizan membranas de ósmosis inversa especiales para ello, por ejemplo, equipos de diálisis en hospitales, concentración de suero de leche, concentrado de zumo de frutas, concentrado de vino, con-

- Una opción muy práctica e interesante es la oxidación de membranas de ósmosis inversa, tanto de agua de mar como de agua salobre con cloro. Esto se realiza para obtener membranas de nanofiltración de menor rechazo de sales, ultrafiltración o microfiltración para eliminación de suciedad física en la línea de los filtros de cartuchos. Seguidamente, se muestra en la figura 1 un esquema del proceso de oxidación de membranas:

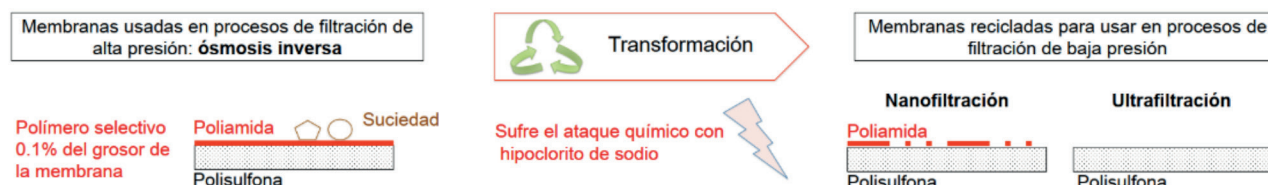


Figura 1. Proceso de oxidación de membranas de ósmosis inversa en membranas de nanofiltración o ultrafiltración (<http://www.life-transformem.eu/>)

centrado de jarabe de glucosa o concentrado de café, y terminan muy sucias en menos de un mes. En este sentido se tienen que reemplazar muchas membranas en poco tiempo. Estudiando cada aplicación industrial que requiera ósmosis, en función de la salinidad y las presiones, se puede proponer la reutilización de membranas de segunda mano. Estas membranas pueden proceder de otras plantas desaladoras para explotarlas aún más antes de tirarlas en otros procesos.

- También se abre la posibilidad de los lixiviados procedentes de las basuras de los vertederos que en ocasiones llevan un tratamiento de ósmosis inversa para concentrarlos. Este proceso ensucia mucho las membranas, siendo muy difícil encontrar una que tenga una vida lo suficientemente larga para que empiece a ser rentable. En estos casos se puede considerar la opción de reutilizar membranas de agua de mar, si la salinidad del lixiviado es cercana a la de la misma que es muy común. En el caso de una salinidad menor se podrían reutilizar membranas de terciarios o plantas de agua salobre.

De esta manera se aprovecharían estos elementos de ósmosis inversa en un último proceso de concentración de lixiviados antes de deshacerlos de las membranas tras haber sido aprovechadas al 100%. Respecto al tratamiento del lixiviado, en los complejos existen sistemas de evaporación del lixiviado. Sin embargo, se han venido admitiendo en EDARs que pueden estar tratando actualmente el excedente de lixiviado. Por otro lado, siempre se ha pensado tras consultarlo con expertos en gestión de residuos, que al lixiviado se le podría dar uso como fertilizante previo tratamiento. Como la salinidad es uno de sus grandes problemas, creo que el tratamiento con membranas podría ser muy interesante. Hay bibliografía al respecto y se cree que podría ser una línea de trabajo interesante, empezando, incluso, con algún proyecto.

- Las membranas de una planta de agua salobre son más fáciles de alargar su vida útil mediante limpiezas químicas. Sin embargo, en estas plantas que suelen tener varias etapas, pueden también combinarse las membranas entre ambas etapas antes de desecharlas. Del mismo modo, normalmente las plantas de agua salobre tienen dos o tres etapas como mínimo para alcanzar conversiones cercanas al 75%. Esto nos puede ayudar para reutilizar las membranas más viejas en esa tercera etapa o de sacrificio. Es ahí donde con mayor probabilidad precipitarán las sales antes y se aprovecharán para producir algo más de agua hasta que finalmente se hayan explotado al 100%.

En función del tamaño de poro, la permeabilidad y la capacidad de rechazo las membranas poliméricas se pueden clasificar en: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. El rechazo de estos elementos depende del tamaño del poro y al oxidarlas aumentamos el diámetro de éste como se muestra en la figura 2.

2.2. RECICLADO DE COMPONENTES Y ELEMENTOS DE ÓSMOSIS INVERSA

En este apartado, se pueden describir las acciones técnicas referentes a las oportunidades encontradas en el reciclado de componentes de membranas de ósmosis inversa. Teniendo en cuenta en este caso el concepto de reciclaje como el proceso cuyo objetivo es convertir residuos en nuevos productos o en materia prima para su posterior utilización, no eliminación.

El tratamiento y el reciclado de desechos sólidos plásticos pueden dividirse en cuatro categorías principales: primaria (reextrusión), secundaria (mecánica), terciaria (química) y cuaternaria (recuperación de energía). El reciclado primario se lleva a cabo generalmente en la planta de fabricación mediante la reintroducción de desechos limpios en el ciclo de extrusión.

Por lo general, este proceso no puede aplicarse a productos de desecho sucios, como los módulos de ósmosis inversa limpios, ya que no se espera que los materiales de reciclado alcancen la calidad requerida. Si bien sólo un número reducido de opciones de reciclaje se aplica directamente al reciclado de las membranas de ósmosis inversa, la evaluación de su validez es un paso importante en el proceso para investigar todas las oportunidades de reciclado.

Durante el proceso de reciclado mecánico, los plásticos se trituran físicamente para obtener el tamaño de los productos, se

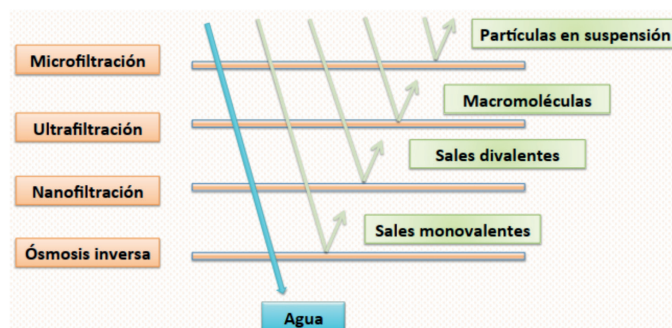


Figura 2. Rechazo de partículas en función del tamaño del poro de las diferentes membranas de ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración o microfiltración (<http://www.life-transformem.eu/>)

separan de los contaminantes, se lavan y se utilizan como materia prima para la producción de nuevos productos. Los polímeros asimilables o incompatibles pueden causar un deterioro de la propiedad mecánica durante el proceso, por lo que para que el reciclaje mecánico sea económicamente viable es importante que haya una gran cantidad de residuos de polímeros plásticos simples que se limpien y sean homogéneos.

En lo que respecta a los materiales de las membranas, cada componente debe considerarse individualmente para determinar su posible idoneidad para el reciclado mecánico, suponiendo que puedan separarse con éxito y de forma económica. Por ejemplo, el espaciador de polipropileno de alimentación tiene la capacidad de reciclarse directamente utilizando este método. De hecho, el polipropileno se recicla comúnmente en contenedores y embalajes debido a la resistencia, las resistencias térmicas y químicas que puede mantener, incluso después de ser reciclado.

Dependiendo del tipo de componentes de poliéster utilizados, como el espaciador de permeado, éstos también tienen la capacidad de ser reciclados mecánicamente. Debido a la naturaleza de su polímero, los materiales de ABS o noryl, como los tapones finales y los tubos de permeado, pueden sufrir un deterioro de las propiedades físicas cuando se reciclan mediante estos métodos, de modo que generalmente se vuelven a procesar mediante otras técnicas.

Finalmente, las láminas de membrana plana, que constituyen una gran proporción del elemento, están construidas con diferentes materiales. Además, las hojas de membrana pueden contaminarse con cualquier tipo de sustancia después de un uso prolongado.

Debido a la naturaleza del proceso y a las razones mencionadas, el reciclaje mecánico directo del módulo puede resultar prohibitivo para la mano de obra y los costos. Esto es porque hay muchos componentes juntos en la membrana plana (poliamida aromática, polisulfona, poliéster, cola, etc.) que junto a la suciedad física que se puede añadir, biofouling, incrustación de sales y demás supone técnicamente casi imposible la separación de estos materiales como en origen y un coste monetario y de tiempo excesivo.

El reciclado químico (o de materia prima) es un proceso que descompone el material plástico en pequeñas moléculas, para ser utilizado como materia prima para procesos petroquímicos, utilizando el método utilizado para crear las cadenas de polímeros, como la despolimerización y la degradación. Los materiales de poliéster (como en el espaciador de permeado y los componentes de la membrana plana son útiles para los procesos de reciclado químico y se utilizan hidrolizados para invertir la reacción de los condensados utilizados para fabricar polímeros, con la adición de agua para la composición causada.

El reciclado químico no puede utilizarse típicamente con materiales contaminados, y aunque es más barato y complejo que el reciclado mecánico y primario, su principal avance es que los polímeros heterogéneos con uso limitado de pretratamiento pueden ser procesados. En este caso, el reciclado químico sí es más factible que el reciclado mecánico para el tratamiento de membranas de ósmosis inversa y podría ser viable a través de una industria pirolítica.

Estos procesos pueden considerarse como opciones de reciclado viables. Las principales categorías de procesamiento térmico utilizadas comúnmente en la industria incluyen la incineración, la pirólisis y el procesamiento térmico en ausencia de oxígeno, gasificación, que es la combustión parcial con aire limitado para producir gas, y la conversión catalítica en combustible.

Desde el punto de vista del medio ambiente, gasificación y

los hidrocarburos ofrecen ventajas sobre la incineración simple, ya que producen menos emisiones, reducen los residuos y aumentan la recuperación de energía. Lo más importante es que estos procesos pueden aplicarse a los residuos plásticos mixtos, como la combinación de materiales utilizados en la fabricación de membranas de ósmosis inversa.

3. RESULTADOS

3.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Teniendo en cuenta la información recogida anteriormente en la tabla 1, en función del número de plantas desalinizadoras existentes en Canarias y las membranas que tiene cada una de ellas, se obtiene un recuento aproximado de 50000 membranas de ósmosis inversa en operación en todas las plantas desaladoras de Canarias, con un reemplazo anual en torno a 10000 membranas que quedarían en desuso, un 20% de reemplazo anual. Se ha llegado a esta estimación teniendo en cuenta una vida media de estos elementos de ósmosis inversa de 5 años, lo que significa 2 años más que la garantía estándar de los fabricantes de membranas que es de 3 años. Se ha tenido en cuenta las plantas de agua salobre cuyo reemplazo es inferior, las plantas de agua de mar con un mayor reemplazo sobre todo las grandes plantas desaladoras que tienen una captación de toma abierta y los requisitos de eficiencia energética y de potabilidad del agua como menos de 1 mg/l de boro en el permeado que exigen actualmente un mayor reemplazo de membranas. Canarias, además, tiene la particularidad de que se aprovechan más las membranas y duran más pero aun así se cumple la estimación anterior. Por lo general, las membranas terminan en vertedero para ser enterradas.

De un total estimado de 687000 m³/d de producción de agua desalada a partir de las plantas desalinizadoras con membranas de ósmosis inversa en la Macaronesia, aproximadamente 660000 m³/d en Canarias, 20000 m³/d en Cabo Verde y 7380 m³/d en Porto Santo, y teniendo en cuenta un flujo medio de trabajo en función de si estas instalaciones disponen de toma abierta o toma de pozo, agua de mar, salobre o terciarios de depuradoras se puede disgregar por islas la siguiente cantidad de membranas en desuso por año aproximadamente, como se muestra en la tabla 2.

3.2. RESULTADOS DEL REÚSO DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA. PROCESO DE OXIDACIÓN

Se destaca la importancia de la reutilización de membranas de ósmosis inversa de las plantas desaladoras y la obtención de los siguientes resultados obtenidos de la oxidación, como se indicó en el apartado 2.1.

- La oxidación de membranas se ha realizado ya y funcionado con éxito en la EDAR de Barranco Seco de Emalsa (Las Palmas de Gran Canaria) por lo que se ha tenido en cuenta para la reutilización de elementos de ósmosis inversa y se estudiará posteriormente su viabilidad técnico-económica para llevarlo a cabo.
- La oxidación de membranas de ósmosis inversa se debe realizar bajo la dosificación de las siguientes cantidades de cloro libre en el tiempo, como se indica en la tabla 3.
- Los resultados positivos que tendría la reutilización de membranas de ósmosis inversa mediante la oxidación de éstas y transformación de éstas en membranas de nanofiltración,

ISLA	Nº DE MEMBRANAS EN USO POR AÑO	REEMPLAZO ANUAL DE MEMBRANAS	PESO (KG) REEMPLAZO	VOLUMEN (M³) REEMPLAZO
Lanzarote (Canarias)	8000	1600	32000	67
Fuerteventura (Canarias)	8650	1730	34600	73
Gran Canaria (Canarias)	23500	4700	94000	197
Tenerife (Canarias)	9350	1870	37400	79
El Hierro (Canarias)	350	70	1400	3
La Gomera (Canarias)	150	30	600	1
Porto Santo (Madeira)	450	45	900	2
Praia-Palmarejo (Cabo Verde)	700	100	2000	4
San Vicente (Cabo Verde)	350	50	1000	2
Sal (Cabo Verde)	350	50	1000	2

Tabla 2. Número de membranas, reemplazo anual, peso y volumen de éstas por isla en la Macaronesia

ultrafiltración o microrfiltración serían básicamente los siguientes:

- El reúso de una membrana de ósmosis inversa supone un menor impacto ambiental que la producción de una nueva. El consumo de agua durante el proceso de transformación de membranas para el reúso de éstas es 20 veces menor que el consumo para la fabricación de nuevas.
- La huella de carbono de membranas reusadas en otros procesos es del orden de 40 a 60 veces menor que la producción de membranas comerciales y el precio de las membranas reusadas es 10 veces menor que el precio de las nuevas. Por tanto, en solo 1 ó 2 años de operación de las membranas reusadas ya resulta beneficioso el proceso de transformación para el reúso de las éstas tanto económicamente como medioambientalmente.
- El proceso de oxidación de membranas puede ser de forma activa en una planta piloto con tubos de presión o en un depósito con varias membranas sumergidas de forma pasiva. Desde el punto de vista económico y medioambiental es mejor la transformación pasiva de las membranas de ósmosis inversa, ya que tan solo se trata de introducir las membranas en bañeras con producto químico, y en el caso de transformación activa requiere de una planta piloto recirculando con un consumo energético extra de la energía eléctrica y medioambiental en cuanto a una mayor huella de carbono.

Se considera factible la reutilización de membranas teniendo en cuenta el alto coste de cada una, en torno a 500 Euros. En este sentido, teniendo en cuenta una vida útil de 5 años, esto supone un coste de amortización anual de 100 Euros por cada membrana de un total de 60000 membranas contabilizadas en Canarias.

Además, hay que reemplazar cada año un 20% del total de membranas lo que supone una cantidad muy considerable, que en vez de pagar por ellas para llevarlas a vertedero se pueden reutilizar y tener ingresos por las mismas.

Existe un riesgo derivado de la reutilización de las membranas en las actividades propuestas si no se llegara a cumplir con los requisitos mínimos estipulados, tanto en la vertiente medio ambiental, como social y económica. De todas formas, el coste

de no reutilizar las membranas se considera mayor debido a que tenemos que pagar por ello.

En este sentido, se obliga a llevar a vertedero a las membranas pagando una tasa. No se podría dar una segunda vida a las membranas, que podría aumentar su rentabilidad y reducir la huella de carbono. Por consiguiente, se considera necesario el reúso de las membranas a pesar del riesgo ya que no hacerlo implicaría costes medio ambientales y socioeconómicos todavía mayores.

Este método con aplicación cloro libre en las concentraciones presentadas anteriormente es factible para cualquier material de membrana de ósmosis inversa, por lo que no existe limitación para su reutilización.

3.3. RESULTADOS DEL RECICLAJE DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA. RECICLAJE Y PROCESO DE PIRÓLISIS

Del mismo modo, se recogen en este apartado los resultados de los procesos de reciclaje y valorización de las membranas de ósmosis inversa a través de un proceso pirolítico explicados también anteriormente en el ítem 2.2.

Para recoger las membranas obsoletas en vertederos de Canarias se paga entre 20 y 30 Euros por tonelada y es más económico esto que darle otro tratamiento fuera de Canarias, perdiendo la oportunidad de obtener un subproducto de ello como puede ser la valorización energética o combustibles a partir de procesos como la pirólisis.

El reciclado de los elementos de ósmosis inversa no existe en Canarias, es una nueva oportunidad de negocio en el sector de residuos. En Europa sólo hay un gestor en Alemania que recicla las membranas, es la empresa MEMRE y tiene un coste de 25 Euros por membrana de ósmosis inversa, pero al añadir el transporte es más caro que llevarlas a vertedero. Por tanto, una opción considerable sería realizar el mismo reciclaje, pero aquí en Canarias.

Por otro lado obtenemos otros resultados a través del proceso de pirólisis, que es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. Los resultados de dicho proceso son los siguientes. El único oxígeno presente es el contenido en el residuo a tratar y las temperaturas de trabajo son inferiores a las de la gasificación, oscilan-

Caso	Concentración de cloro libre (ppm)	Tiempo de exposición (h)	Nivel de exposición (ppm x h)
A	124	50 (NF) – 242 (UF)	6200 (NF) 30000 – 300000 (UF)
B	1240	5 (NF) – 24,2 (UF)	
C	6200	1 (NF) – 4,84 (UF) / 48,4 (UF)	
D	12400	0,5 (NF) – 2,42 (UF)	

Tabla 3. Concentraciones de cloro libre para la oxidación de membranas de ósmosis inversa

do entre 300°C y 800°C. Como resultado del proceso de pirólisis se obtiene lo siguiente: gas, residuo líquido y residuo sólido con las siguientes características cada uno de ellos:

- Los componentes básicos del gas son CO, CO₂, H₂, CH₄ y compuestos más volátiles procedentes del cracking de las moléculas orgánicas, juntamente con los ya existentes en los residuos. Este gas es muy similar al gas de síntesis obtenido en la gasificación, pero hay una mayor presencia de alquitranes, ceras, etc. en detrimento de gases, debido a que la pirólisis trabaja a temperaturas inferiores a la gasificación. Los productos gaseosos son un combustible altamente energético con un poder calorífico de 50 MJ/m³ aproximadamente.
- El residuo líquido está compuesto básicamente por hidrocarburos de cadenas largas como alquitranes, aceites, fenoles, ceras formados al condensar a temperatura ambiente.
- El residuo sólido, compuesto por todos aquellos materiales no combustibles, los cuales o bien no han sido transformados o proceden de una condensación molecular con un alto contenido en carbón, metales pesados y otros componentes inertes de estos residuos.

Los residuos líquidos y gaseosos pueden aprovecharse mediante combustión a través de un ciclo de vapor para la producción de energía eléctrica. El residuo sólido puede utilizarse como combustible en instalaciones industriales como, por ejemplo, en plantas cementeras.

Se puede desarrollar la valorización energética e incineración de las membranas, para lo cual es necesario eliminar el encapsulado de fibra de vidrio de éstas. Esto no supone dificultad, y el resto de los elementos que sí son muy difíciles de separar porque están encolados y mezclados entre sí son todos elementos plásticos (poliamida aromática, polisulfona, poliéster, polietileno, noryl, etc.) que se pueden incinerar para producir energía. Igualmente, la pirólisis es un tratamiento térmico que mezcla diferentes plásticos como pueden ser los que conforman las membranas de ósmosis inversa, ya que no tiene PVC, metales o materiales orgánicos que serían perjudiciales, obteniendo finalmente combustibles de alto poder calorífico como subproductos de estos elementos.

En Canarias no existe incineradora, pero se podría centralizar su instalación en una isla para la recogida de todas estas membranas de ósmosis inversa y darles tratamiento. Igualmente, no existe ninguna industria que realice el proceso de pirólisis en Canarias, pero ya se ha proyectado una en Tenerife (Plastics Energy) donde se podrían enviar todos los elementos de ósmosis inversa para este fin. Seguidamente, se estudiará también posteriormente la viabilidad técnico-económica de estos procesos.

Respecto a la cogeneración de los Complejos Ambientales de Salto del Negro y Juan Grande (Gran Canaria), estas consisten en el aprovechamiento del biogás generado en los procesos biológicos y en el vertedero, por lo que tienen nada que ver con la valorización energética de residuos plásticos.

4. CONCLUSIONES

En los procesos de desalación de agua de mar, salobre y terciarios, hay aspectos mejorables como la reutilización de elementos de ósmosis inversa.

Esta reutilización de membranas se puede conseguir con reemplazos parciales, cambiando las situadas en primeras posiciones más sucias por las de últimas posiciones menos dañada. Esto supone una alternativa viable económicamente a muy bajo coste.

Por otro lado, la oxidación de membranas de ósmosis inversa obsoletas nos da la oportunidad de obtener un nuevo subproducto

como filtro de cartucho (microfiltración), ultrafiltración o nanofiltración. Esto se puede desarrollar para reutilizar por ejemplo las muy dañadas como las de primeras posiciones en los tubos de presión.

En este sentido se muestra la viabilidad de apostar por hacer una oxidación y vender las nuevas membranas a 15 Euros, que coincide con el precio de mercado de un filtro de cartucho que sería el producto sustitutivo a la membrana oxidada que se ha conseguido.

Se muestra como una oportunidad el reciclado de elementos de ósmosis inversa de las plantas desaladoras, como iniciativa pionera en España y ya con algunas experiencias contrastadas en Europa. En este momento sólo hay un gestor en Alemania que recicla las membranas que es la empresa MEMRE y tiene un coste de 25 EUR por membrana de ósmosis inversa.

La valorización energética, vía incineración, es factible pero no se considera de acuerdo con los problemas medioambientales, sociales y políticos que ello puede generar.

Por otro lado, en el reciclado de los elementos de ósmosis inversa se ve factible la vía de la industria pirolítica y enviar allí todas las membranas de ósmosis que estén obsoletas.

Se trata de una oportunidad de negocio viable tanto técnica como económicamente y con un futuro prometedor en el mercado actual del reciclaje.

REFERENCIAS

- [1] Planificación y gestión del agua. DYNA. Vol. 75 (2000) 61-63.
- [2] León Zerpa, F., Ramos Martín, A. (2020). Sistema de medición en continuo de bajo coste para determinar la relación entre la conductividad eléctrica "EC" y la temperatura "T" en aguas salobres. DYNA. Doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9812>
- [3] León Zerpa, F., Ramos Martín, A., Mendieta Pino, C., (2020). Prueba piloto de membranas de alta eficiencia para la optimización de sistemas de membranas en la planta de desalinización de Carboneras. DYNA. Doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9812>
- [4] Francisco J. García Latorre, Sebastián O. Pérez Báez and Antonio Gómez Gotor. Energy performance of a reverse osmosis desalination plant operating with variable pressure and flow. Desalination 366 (2015) 146-153.
- [5] Jamel Kherijl, Armine Mnif, et al. Study of the influence of operating parameters on boron removal by a reverse osmosis membrane. Desalination and Water Treatment. Vol. 56 N° 10 (2015) 2653-2662.
- [6] Julieta Schallenberg-Rodriguez, José Miguel Veza and Ana Blanco-Marigorta. Energy efficiency and desalination in the Canary Islands. Renewable and Sustainable Energy Reviews 40 (2014) 741-748.
- [7] Noel Dow, Stephen Gray, et al. Pilot trial of membrane distillation driven by low grade waste heat: Membrane fouling and energy assessment. Desalination (2016).
- [8] Nur Muna Mazlan, Dimitar Peshev, Adrew G. Livingston. Energy consumption for desalination – A comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes. Desalination 377 (2016) 138-151.
- [9] Evangelos Dimitriou, Essam Mohamed, et al. Experimental comparison of the performance of two reverse osmosis desalination units equipped with different energy recovery devices. Desalination and Water Treatment. Vol. 55 N° 11 (2015) 3019-3026.
- [10] Evangelos Dimitriou, Essam Mohamed, et al. Experimental investigation of the performance of a reverse osmosis desalination unit under full-and part-load operation. Desalination and Water Treatment. Vol. 53 N° 12 (2015) 3170-3178.