

LIFE+13 TRANSFOMEM: TRANSFORMACIÓN DE MEMBRANAS DESECHADAS DE ÓSMOSIS INVERSA EN MEMBRANAS RECICLADAS DE ULTRAFILTRACIÓN Y NANOFILTRACIÓN

EL OBJETIVO DEL PROYECTO TRANSFOMEM ES INCREMENTAR LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS MEDIANTE MEMBRANAS, MEJORANDO SU DURABILIDAD Y REDUCIENDO LOS COSTES AMBIENTALES ASOCIADOS A ESTA TECNOLOGÍA. ELLO SE CONSEGUIRÁ RECICLANDO, CON MÉTODOS RESPETUOSOS CON EL MEDIO AMBIENTE, LAS MEMBRANAS USADAS EN LA DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA Y UTILIZANDO ESAS MEMBRANAS TRANSFORMADAS EN PROCESOS DE FILTRACIÓN DE BAJA PRESIÓN. ESTAS MEMBRANAS, CON UNA PERMEABILIDAD SENSIBLEMENTE MAYOR, TENDRÁN APLICACIONES DIRECTAS: EN EL PRETRATAMIENTO DE LOS PROCESOS DE ÓSMOSIS INVERSA, EN EL TRATAMIENTO DE AGUA SALOBRE Y EN EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES DE TAL FORMA QUE LA APLICACIÓN DE MEMBRANAS REGENERADAS PERMITA ALCANZAR LA CALIDAD DE AGUA REQUERIDA PARA SU POSTERIOR REUTILIZACIÓN.

LIFE TRANSFOMEM, proyecto co-financiado por la Comunidad Europea a través del instrumento financiero LIFE+, con el contrato n. LIFE13 ENV/ES/000751, tiene como principal objetivo el incrementar la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento de aguas mediante membranas, mejorando su durabilidad y reduciendo el impacto ambiental asociado a esta tecnología.

Para ello se reciclarán mediante métodos respetuosos con el medio ambiente, las membranas usadas en la desalación por ósmosis inversa y se reutilizarán esas membranas transformadas en procesos de filtración de baja presión. Estas membranas, con una permeabilidad sensiblemente mayor, tendrán aplicaciones directas en el pretratamiento de los procesos de ósmosis inversa, en el tratamiento de agua salobre y en el tratamiento terciario de aguas residuales. El desarrollo de las actividades técnicas del proyecto tendrán lugar en plantas pilotos creadas por SADYT y Valoriza Agua, que han sido puestas en marcha a partir de agosto de 2015. Además, estarán acompañadas de un estudio económico y financiero y de un exhaustivo plan divulgación y monitoreo.

El instituto IMDEA Agua, coordinador de este proyecto, en colaboración con sus socios SADYT y VALORIZA AGUA dieron comienzo a este proyecto el 1 de Junio de 2014, contando con un presupuesto de 954,977 € (50% financiación europea-LIFE). El proyecto cuenta con una página web (www.life-transfomem.eu) y redes sociales donde está disponible toda la información de divulgación y resultados generados a lo largo de la ejecución del proyecto.

¿Por qué apostar por el reciclaje de membranas?

Según datos de la Asociación Internacional de Desalación (IDA), en el mundo hay instalada una capacidad de desalación por membranas que supera los 80 Hm³/día. La creciente evolución del mercado de la desalación ha implicado el aumento del uso de los recursos relacionados con la tecnología de membrana, lo que ha supuesto un incremento en la generación de residuos asociado a esta tecnología. Existe a nivel mundial una tasa significativa de reposición de membranas en las plantas de tratamiento, que generalmente oscila entre el 10% al 33% de las membranas instaladas, en función de la calidad del agua a tratar (agua salobre, agua de río, fluidos industriales o efluentes secundarios de agua residual) y de si la toma de

LIFE+13 TRANSFOMEM: CONVERSION OF END-OF- LIFE REVERSE OSMOSIS MEMBRANES INTO RECYCLED ULTRAFILTRATION AND NANOFILTRATION MEMBRANES

THE OBJECTIVE OF THE TRANSFOMEM PROJECT IS TO INCREASE THE SUSTAINABILITY OF MEMBRANE WATER TREATMENT SYSTEMS BY IMPROVING THE DURABILITY OF SUCH SYSTEMS AND REDUCING THE ENVIRONMENTAL COSTS ASSOCIATED WITH THIS TECHNOLOGY. THIS IS TO BE ACHIEVED THROUGH THE RECYCLING, USING ECO-FRIENDLY METHODS, OF REVERSE OSMOSIS DESALINATION MEMBRANES AND USING THE CONVERTED MEMBRANES IN LOW-PRESSURE FILTRATION PROCESSES. THESE MEMBRANES, WITH SIGNIFICANTLY HIGHER PERMEABILITY, WILL HAVE TWO DIRECT APPLICATIONS: IN THE PRETREATMENT STAGE OF BRACKISH WATER REVERSE OSMOSIS PROCESSES AND IN TERTIARY TREATMENT OF WASTEWATER, IN SUCH A WAY THAT THE USE OF THE REGENERATED MEMBRANES WILL ENABLE THE WATER QUALITY STANDARDS REQUIRED FOR SUBSEQUENT REUSE TO BE ACHIEVED.

LIFE TRANSFOMEM is a project co-funded by the European Union through the LIFE+ financing instrument (contract no. LIFE13 ENV/ES/000751). It has the goal of increasing the sustainability of membrane water treatment systems by improving the durability of such systems and reducing the environmental costs associated with this technology. For this purpose, membranes used in reverse osmosis desalination will be recycled using eco-friendly methods and these converted membranes will be reused in low-pressure filtration processes. These membranes, with significantly higher permeability, will have direct applications in the pretreatment stage of brackish water reverse osmosis processes and in tertiary treatment of wastewater. The technical activities associated with the project will be undertaken at pilot plants set up by SADYT and Valoriza Agua. These plants went into operation in June 2015. The technical research will be accompanied by a financial/economic study and an exhaustive dissemination and monitoring plan.

As project coordinator, the IMDEA Agua Institute launched the project on June 1st 2014 in cooperation with partners SADYT and VALORIZA AGUA. The project has a budget of €954,977 (50% funded by the EU LIFE Programme). TRANSFOMEM has a website (www.life-transfomen.eu) and social media pages, where all information and results generated throughout the project is available.

Why membrane recycling?

According to International Desalination Association (IDA) figures, there is a total worldwide installed capacity for membrane desalination of over 80 Hm³/d. The growing development of the desalination market has resulted in increased use of resources related to membrane technology, leading to an increase in the generation of waste associated with this technology. There is a significant membrane replacement rate at treatment plants worldwide, generally ranging from 10% to 33% of installed membranes, depending on the quality of the water treated (brackish water, river water, industrial fluids or secondary wastewater effluents, and whether the intake is open (in the sea) or closed (wells)). According to a 2005 Global Water Intelligence report, 61.1% of the capacity of membranes installed worldwide corresponds to reverse osmosis membranes for seawater and brackish water desalination.

agua es abierta (desde el mar) o cerrada (pozos). Según el informe de Global Water Intelligent publicado en 2005, el 61,1% de la capacidad de membranas instaladas a nivel mundial corresponde a membranas de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar y agua salobre.

En la actualidad, la gestión de las membranas está enmarcada en una realidad que no es coherente con los principios básicos de las leyes ambientales europeas. La Directiva 2008/98/CE sobre residuos (Dir. 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008), establece un orden de prioridades para la gestión de los residuos: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otro tipo de valoración y por último la eliminación.

La deposición anual en vertederos de millones de unidades de membranas es a día de hoy, la solución rápida para un material considerado desecho y que sin embargo aún tiene un gran potencial de aplicación. Mientras que se fabrican nuevas membranas con nuevos materiales plásticos que implican el uso de combustibles fósiles, las antiguas ocupan terreno de forma innecesaria y con materiales no degradables, valiosos y reciclables.

Como consecuencia, la búsqueda de alternativas a la eliminación de los módulos desechados de ósmosis inversa se está convirtiendo en una nueva línea de investigación dentro de la comunidad científica. Mientras que existen numerosos trabajos relacionados con la preparación de las membranas para reintroducirlas en procesos de ósmosis inversa [1–4], menos frecuente es encontrar trabajos relacionados con la transformación de membranas de ósmosis inversa a membranas de nanofiltración y ultrafiltración. No obstante, hay estudios que comienzan a revelar datos esperanzadores [4–6]. En este sentido LIFE+13 TRANSFOMEM, abordará a escala piloto el proceso de transformación de membranas desechadas de ósmosis inversa.

La tecnología de membranas constituye uno de los campos más importantes dentro de los procesos de separación. La aplicación de tecnologías de membrana, tales como microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y la nanofiltración (NF), están siendo intensivamente empleadas en el tratamiento de las aguas superficiales destinadas a consumo humano y también, aunque en menor medida, en el tratamiento de aguas residuales. La necesidad de cumplir con estrictas normas relativas a la calidad del agua así como un creciente interés en fluidos de procesos con mayor nivel de pureza, hacen pronosticar que la tecnología de membranas está actualmente, y estará en un futuro, muy presente en los sistemas de tratamiento. Por ello, si las membranas recicladas de ultrafiltración y nanofiltración resultan ser competitivas con respecto a las membranas comerciales, su comercialización podría revolucionar el mercado actual.

Principio básico del reciclaje

Según el estudio de mercado publicado en Water Executive en 2004, el 91% de las ventas de membranas de ósmosis inversa y

In practice, current membrane management takes place within a framework that is not coherent with the basic principles of European environmental legislation. Directive 2008/98/EC on waste (Dir. 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council, 19th of November 2008) sets out a hierarchy of priorities for waste treatment (prevention, preparation for reuse, recycling, other types of recovery and, finally, disposal). The landfilling of millions of membranes is currently the quick solution for a material considered as waste, but the reality is that it still has great potential for use. While new membranes are manufactured with plastics involving the use of fossil fuels, old membranes containing valuable, recyclable, non-degradable materials are landfilled unnecessarily.

In consequence, the search for an alternative to the disposal of end-of-life reverse osmosis membranes is becoming a new line of research for the scientific community. While there are a lot of studies related to membrane preparation for the purpose of reintroducing them into reverse osmosis processes [1–4], it is less frequent to find studies on converting reverse osmosis membranes into nanofiltration and ultrafiltration membranes. Nonetheless, some studies are beginning to show promising results [4–6]. In this respect, LIFE+13 TRANSFOMEM will address the process of converting end-of-life reverse osmosis membranes at pilot scale.

Membrane technology is amongst the most important fields within separation processes. Membrane technology, such as microfiltration (MF), ultrafiltration (UF) and nanofiltration (NF), is being applied intensively in the treatment of surface water for human consumption and, to a lesser extent, in wastewater treatment. The need for compliance with stringent water quality standards and a growing interest in process fluids of greater purity make it foreseeable that membrane technology will have a strong presence in current and future treatment systems. For this reason, if recycled ultrafiltration and nanofiltration membranes prove to be competitive with respect to commercially manufactured membranes, they may well revolutionise the current market.

Basic recycling principle

According to a market study published by Water Executive in 2004, 91% of reverse osmosis and nanofiltration membranes sold are spiral wound modules. Spiral wound reverse osmosis modules (Figure 1) are manufactured in the form of sheets wound within a product tube that collects the (clean) permeate water.

Each filtration sheet is made up of composite (TFC, Thin Film Composite) membranes composed of 3 layers (Figure 2): an aromatic polyamide layer that is in contact with the water and acts as a selective barrier (0.2 μm thickness), supported by a polysulphone micro-porous sheet (40 μm) and a polyester structural support (120-150 μm thickness) [8].

Polyamide is a polymer that is highly sensitive to exposure to oxidising agents, such as sodium hypochlorite [9]. Awaiting of this sensitivity, this chemical agent is used to achieve the controlled degradation of the polyamide layer. If degradation

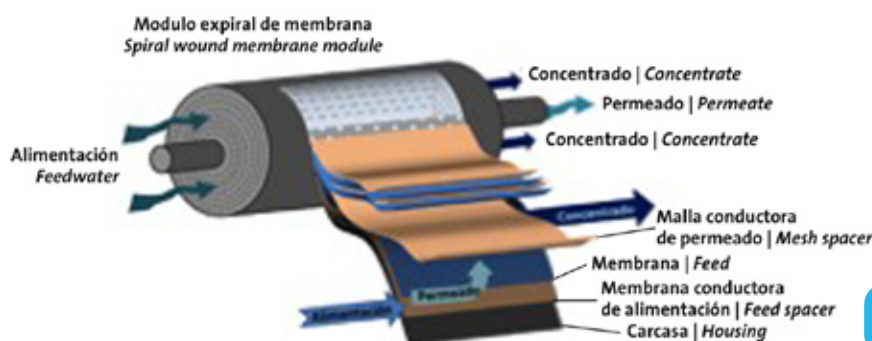


Figura 1. Esquema de un módulo en espiral de membranas [7].
Figure 1. Diagram of a spiral wound membrane [7].

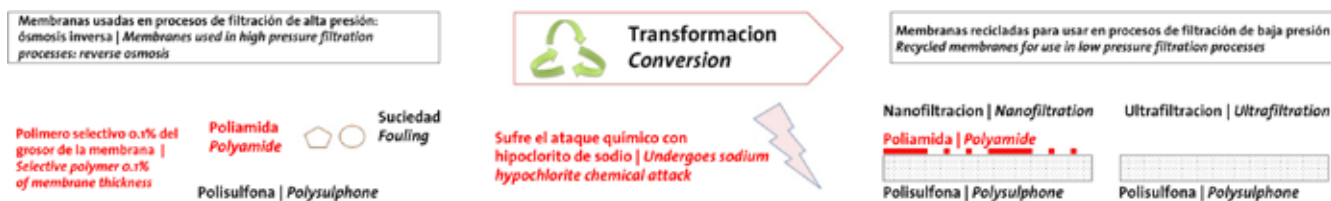


Figura 2. Esquema conceptual del proceso de transformación (Elaboración propia). | Figure 2. Conceptual diagram of conversion process (Source: authors).

nanofiltración corresponden a módulos espirales. Los módulos de ósmosis inversa con configuración en espiral (Figura 1) se fabrican en forma de láminas enrolladas en un tubo colector que recoge el agua permeada (limpia).

Cada lámina de filtración está constituida por membranas compuestas (TFC, Thin Film Composite) formadas a su vez por 3 capas (Figura 2): una capa de poliamida aromática que está en contacto con el agua y actúa como barrera selectiva (0,2µm de espesor), soportada por una lámina microporosa de polisulfona (40 µm) y un soporte estructural de poliéster (120-150 µm de espesor) [8].

La poliamida es un polímero altamente sensible a la exposición de agentes oxidantes como el hipoclorito de sodio [9]. Aprovechando dicha sensibilidad, este agente químico se emplea para degradar de forma controlada la capa de poliamida. Si la degradación es parcial, se pueden obtener membranas con propiedades típicas de nanofiltración. Sin embargo, si la capa de poliamida se degrada totalmente, se pueden obtener membranas de polisulfona con propiedades típicas ultrafiltración. En la Figura 2 se muestra un esquema conceptual del proceso de transformación.

Resultados obtenidos sobre transformación a escala laboratorio

La investigación realizada por IMDEA Agua ha permitido establecer los protocolos de caracterización de membranas a través de autopsias y medidas de permeabilidad y rechazo de soluciones con compuestos orgánicos, inorgánicos y microbiológicos. Además, se han establecido criterios de transformación empleando el hipoclorito de sodio.

De momento, los resultados obtenidos se han elaborado y difundido tanto en revistas de divulgación como en revistas y congresos científicos y están accesibles en la web del proyecto.

Por un lado, los resultados sobre las autopsias y caracterización de la superficie de membranas deterioradas y transformadas han sido presentados en el congreso internacional de la IDA, San Diego, California, en septiembre de 2015 [10]. Las técnicas de caracterización empleadas son: el análisis micrográfico de imágenes de la sección frontal y transversal de las membranas obtenidas a través del microscopio electrónico de barrido (SEM), el análisis de los grupos funcionales de los materiales poliméricos de las membranas mediante espectroscopía (ATR-FTIR), el análisis de la hidrofilia a través de medidas del ángulo de contacto y la determinación del peso molecular de corte (MWCO) mediante cromatografía de permeación en gel (GPC).

La autopsia incluyó además de las técnicas citadas, el análisis microbiológico para la determinación de las bacterias que generan biofilm, la determinación del porcentaje de ensuciamiento orgánico e inorgánico mediante técnicas termogravimétricas (TGA), el análisis de los elementos metálicos que componen la parte inorgánica del ensuciamiento y el análisis del daño de la superficie de las membranas por contacto con compuestos halogenados antes del proceso de transformación mediante el test de Fujiwara.

is partial, membranes with properties that are typical of nanofiltration membranes can be obtained. And if the polyamide layer is fully degraded, polysulphone membranes with properties typical of ultrafiltration membranes can be obtained. Figure 2 shows a conceptual diagram of the conversion process.

Results obtained on conversion at laboratory scale

The research work carried out by IMDEA Agua has enabled the establishment of membrane characterisation protocols through the implementation of autopsies, permeability measurements, and measurements of rejection rates for solutions with organic, inorganic and microbial compounds. Furthermore, criteria for conversion using sodium hypochlorite have been established.

The results obtained to date have been drawn up and disseminated in general science publications, technical scientific publications and at scientific conferences. These results are also available on the project website.

The results of the autopsies and the characterisation of the converted membrane surfaces were presented at the international IDA Congress in San Diego, California in September of 2015 [10]. The characterisation techniques used are: micrographic analysis of images of the front and cross sections of the membranes, obtained by means of scanning electron microscopy (SEM), analysis of the functional groups of the polymeric membrane materials by means of spectroscopy (ATR-FTIR), hydrophilic analysis by means of contact angle measurements and the determination of molecular weight cut off (MWCO) using gel permeation chromatography (GPC). In addition to the aforementioned techniques, the autopsy also included microbiological analysis to determine the bacteria that generate biofilm, thermogravimetric analysis (TGA) to determine the percentage of organic and inorganic fouling, analysis of the metal elements making up the inorganic portion of fouling, and analysis of the damage to the membrane surface caused by contact with halogenated compounds prior to conversion, by means of the Fujiwara test.

The second publication will include the results on permeability and rejection capacities of the converted membranes, with respect to both ionic compounds and organic matter with a low molecular weight. Moreover, this second publication will feature a description of the optimal conversion conditions for the creation of recycled nanofiltration and ultrafiltration membranes.

By way of illustration, Figure 3 shows a comparative example of the results obtained, at laboratory scale, of the permeate flow when filtering Milli-Q water, a saline solution of 2000 mg/L of NaCl and industrial wastewater (provided by a pharmaceutical company collaborating in the REMTAVARES project of the Autonomous Community of Madrid) at a pressure of 15 bar.

Table 1 shows the physicochemical quality of the industrial wastewater from a pharmaceutical company, which, prior

Tabla 1. Calidad físico-química del agua residual industrial
Table 1. Physicochemical quality of the industrial wastewater

Parámetros físico-químicos ARI ARI physicochemical parameters	Media Average		± sd		Iones (mg/L) Ions (mg/L)	
	Media Average	± sd	Media Average	± sd	Media Average	± sd
Conductividad (mS/cm) Conductivity (mS/cm)	18,44	± 0,17	Na+	2,256	± 223	
pH	8	± 0,7	NH4+	43	± 6	
TOC (ppm) TOC (ppm)	4,657	± 253	K+	3,524	± 340	
TC (ppm) TC (ppm)	4,734	± 241	Ca2+	33	± 37	
DQO (mg/L) COD (mg/L)	14,230	± 994	F-	415	± 40	
TSS (mg/L) TSS (mg/L)	81	± 2	Cl-	4,646	± 417	
Color (Pt-Co) Color (Pt-Co)	502	± 167	SO42-	30	± 8	

Por otro lado, los resultados sobre la permeabilidad y la capacidad de rechazo de las membranas transformadas, tanto de compuestos iónicos como de materia orgánica de bajo peso molecular han sido publicados en la revista Journal of Membrane Science [6]. Además, en este artículo se describen también las condiciones óptimas de transformación para generar membranas recicladas de nanofiltración y ultrafiltración. [6] (García-Pacheco et al., 2015).

Además, se describirán las condiciones óptimas de transformación para generar membranas recicladas de nanofiltración y ultrafiltración.

A modo ilustrativo, en la Figura 3 se muestra un ejemplo comparativo de los resultados obtenidos, a escala laboratorio, del flujo de permeado al filtrar a 15 bar de presión agua Milli-Q, una solución salina de 2000 mg/L de NaCl y agua residual industrial (cedida por una empresa farmacéutica que colabora con el proyecto REMTAVARES de la Comunidad de Madrid).

to undergoing treatment went through a 0.45 µm filtration process.

The reverse osmosis membrane model analysed (Toray TM 720-400) was the same in all cases. In order to carry out a comparative study, the following membrane types were used: a membrane extracted from a deteriorated commercial module, a membrane extracted from the same deteriorated module and then recycled, and a new membrane (the same commercial model, unused and provided by Toray). The equipment used at laboratory scale was a system of flat membranes and cross flow filtration that simulates industrial operating conditions similar to those applied in commercial spiral wound modules, with a specific membrane surface area of 84 cm².

The deteriorated reverse osmosis membrane was converted into a nanofiltration membrane. Compared to the remaining membranes, this membrane achieved permeate flows of 6 times greater when filtering Milli-Q water and salt water, and 10 times greater when filtering industrial wastewater. Despite a reduction in the ion rejection capacity, particularly that of monovalent ions, over 80% of sulphate ions and organic matter was rejected.

LIFE TRANSFOMEM project – expected results

The aim is to generate recycled membranes that can compete with commercial membranes in terms of permeability, rejection, life span and cleaning cycles.

LIFE TRANSFOMEM may represent the beginning of a change in the management of this solid waste from the desalination process. The project aims to generate recycled membranes that can compete with commercial membranes in terms of permeability, rejection, lifespan and cleaning cycles. Moreover, since each end-of-life membrane has a different degree of fouling and a different organic composition (polyamide and polysulphone) depending on the manufacturer, the aim is to identify those that are most suitable for the conversion process.

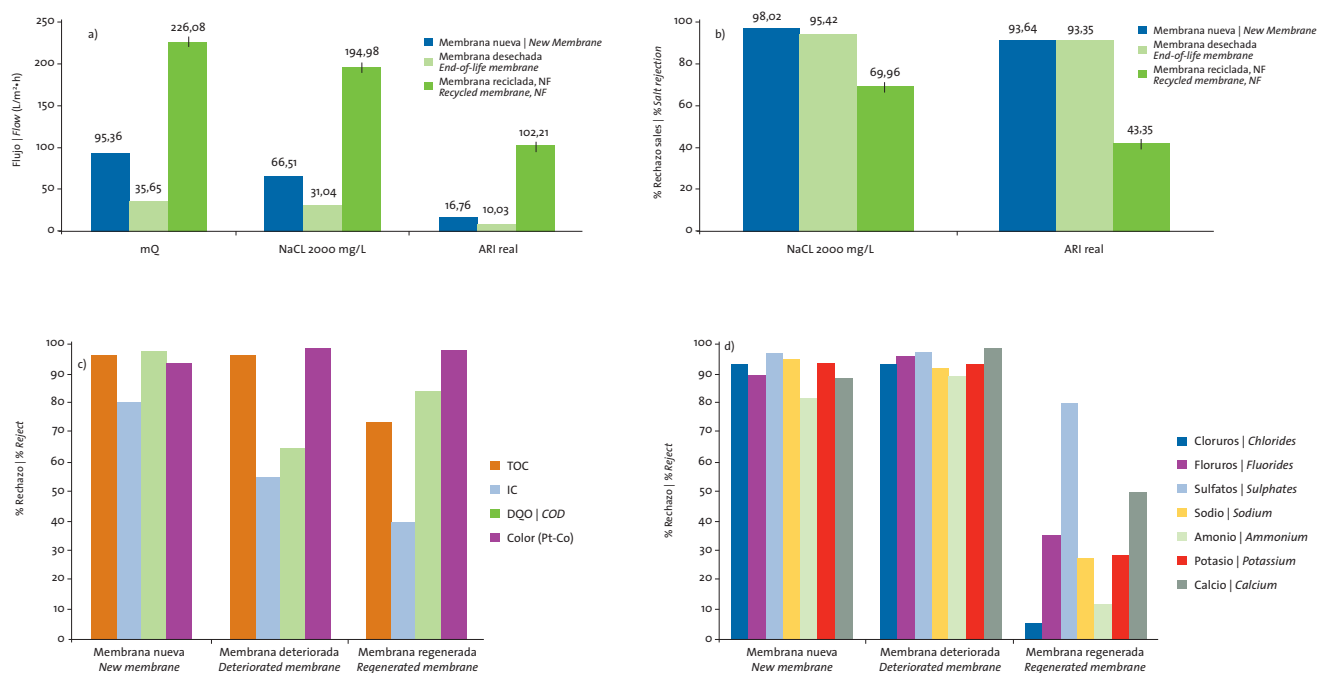


Figura 3. Comparación de una membrana de ósmosis nueva, deteriorada y reciclada (regenerada) empleadas para la filtración de agua Milli-Q, una disolución salina y agua residual industrial. a.) Flujo permeado, b.) Rechazo de sales, c.) Rechazo de materia orgánica y d.) rechazo de iones. | Figure 3. Comparison of new, deteriorated and recycled reverse osmosis membranes used for the filtration of Milli-Q water, a saline solution and industrial wastewater. a.) Permeate flow b.) Salt rejection c.) Organic matter rejection d.) Ion rejection.

La Tabla 1 muestra la calidad físico-química del agua residual procedente de una industria farmacéutica que previo al tratamiento con membranas fue filtrada por 0,45 µm.

El modelo de membrana de ósmosis inversa analizado fue el mismo en todos los casos (Toray TM 720-400). Con la finalidad de llevar a cabo un estudio comparativo, se han empleado: una membrana extraída de un módulo comercial deteriorado, una membrana igualmente extraída del mismo módulo deteriorado pero reciclada y por último una membrana nueva (sin usar del mismo modelo comercial y cedido por la casa comercial Toray).

El equipo empleado a escala laboratorio fue un sistema de membranas planas y filtración tangencial que simula las condiciones de operación industriales similares a los aplicados en los módulos comerciales en espiral, con una superficie específica de membranas de 84 cm².

La membrana de ósmosis inversa deteriorada fue transformada en una membrana de nanofiltración, que en comparación con el resto de membranas, adquirió flujos de permeado 6 veces superiores cuando filtró agua Milli-Q y agua salina y 10 veces mayores en el caso del agua residual industrial. A pesar de que se redujo la capacidad de rechazar iones, sobre todo iones monovalentes, se rechazaron en más de un 80% los iones sulfatos y la materia orgánica.

Resultados esperados del proyecto LIFE TRANSFOMEM

Se pretende generar membranas recicladas competitivas con respecto a las membranas comerciales, en términos de permeabilidad, rechazo, tiempo de vida y ciclos de limpieza.

LIFE TRANSFOMEM podría suponer el inicio del cambio de gestión de este residuo sólido de la desalación. En el proyecto se pretende generar membranas recicladas competitivas con respecto a las membranas comerciales, en términos de permeabilidad, rechazo, tiempo de vida y ciclos de limpieza. Además, como cada membrana desechada tiene un ensuciamiento específico y cada membrana tiene una composición orgánica diferente (de poliamida y polisulfona) en función de la casa comercial, se pretende identificar cuáles son las más apropiadas para usar en el proceso de transformación.

Conclusiones

La sociedad europea del reciclado se ha de crear paso a paso. Dentro de la consolidada tecnología de las membranas de ósmosis inversa, la gestión de los módulos agotados es a día de hoy un reto muy importante que hay que afrontar si queremos cumplir con los términos de desarrollo sostenible. ¿Para qué desechar materiales con un gran potencial de reutilización? ¿Podría ser el reciclaje un modo de aumentar la vida útil de los materiales que constituyen las membranas? ¿Qué ahorro en términos económicos (teniendo en cuenta el medio ambiente) y financieros supondría el reciclaje? El proyecto LIFE TRANSFOMEM, pretende dar respuestas técnicas a estas preguntas en un plazo de 4 años.

Agradecimientos

El equipo investigador agradece al instrumento LIFE por co-financiar parte de este proyecto LIFE ENV/ES/000751 TRANSFOMEM y al proyecto REMTAVARES S2009/AMB-1588 por facilitar muestras de agua real industrial.

Conclusions

The European recycling society has to be created step by step. Within the consolidated technology of reverse osmosis membranes, the management of end-of-life modules is currently a very significant challenge that must be overcome if we are to achieve sustainable development. Why throw away materials with great potential for reuse? Could recycling be the way of extending the service life of the materials of which membranes are composed? What financial and economic savings (bearing in mind environmental factors) can be achieved through recycling? The LIFE TRANSFOMEM project seeks to provide technical responses to these questions within a period of 4 years.

Acknowledgements

The research team would like to express their gratitude to the LIFE instrument for co-funding this LIFE ENV/ES/000751 TRANSFOMEM project and to the REMTAVARES S2009/AMB-1588 project for the provision of industrial wastewater samples.

Bibliography

1. H.D. Raval, J.J. Trivedi, S.V. Joshi, C.V. Devmurari, Flux enhancement of thin film composite RO membrane by controlled chlorine treatment, *Desalination*. 250 (2010) 945–949.
2. A. Ettori, E. Gaudichet-Maurin, P. Aimar, C. Causserand, Pilot scale study of chlorination-induced transport property changes of a seawater reverse osmosis membrane, *Desalination*. 311 (2013) 24–30.
3. S. Muñoz, R. Frank, I. Pilar, C. Pérez, F. Xavier Simón, LIFE + REMEMBRANE : Recuperación inversa al final de su vida útil, *FuturEnviro*. Noviembre (2014) 1–5.
4. J.M. Veza, J.J. Rodríguez-gonzalez, Second use for old reverse osmosis membranes : wastewater treatment, 157 (2003) 65–72.
5. W. Lawler, A. Antony, M. Cran, M. Duke, G. Leslie, P. Le-Clech, Production and characterisation of UF membranes by chemical conversion of used RO membranes, *J. Memb. Sci.* 447 (2013) 203–211.
6. R. García-Pacheco, J. Landaburu-Aguirre, S. Molina, L. Rodríguez-Sáez, S.B. Teli, E. García-Calvo, Transformation of end-of-life RO membranes into NF and UF membranes: Evaluation of membrane performance, *J. Memb. Sci.* 495 (2015) 305–315
7. S. Molina, R. García-Pacheco, L. Rodríguez-Sáez, E. García-Calvo, E. Campos, D. Zarzo, et al., Transformation of end-of-life RO membranes into recycled NF and UF membranes, surface characterization, in: *IDA World Congress proceeding*, 2015.
8. S. Molina Martínez, Preparación de membranas porosas a partir de poliamidas aromáticas hidrofílicas. Estudios de aplicación en operaciones de ultrafiltración y pervaporación, Universidad Complutense de Madrid, 2012.
9. K.P. Lee, T.C. Arnot, D. Mattia, A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential, *J. Memb. Sci.* 370 (2011) 1–22
10. S. Molina, R. García-Pacheco, L. Rodríguez-Sáez, E. García-Calvo, E. Campos, D. Zarzo, et al., Transformation of end-of-life RO membranes into recycled NF and UF membranes, surface characterization, in: *IDA World Congress proceeding*, 2015.



Eloy García Calvo. Coordinador del proyecto. Comité de Dirección (IMDEA Agua)
Project coordinator. Board of Directors (IMDEA Agua)
Domingo Zarzo Martínez. Comité de Dirección (SADYT-Valoriza Agua)
Board of Directors (SADYT-Valoriza Agua)
Raquel García Pacheco. Responsable técnico del proyecto (IMDEA Agua)
Technical project manager (IMDEA Agua)
Elena Campos Pozuelo. Investigadora del proyecto (Valoriza Agua)
Project researcher (Valoriza Agua)