



Defensa de Tesi Doctoral de **Julian Mamo**

# Assessment and optimization of the operation of integrated membrane systems for wastewater reclamation

**Directors:** Dr. Joaquim Comas Matas, Dr. Ignasi Rodriguez-Roda Layret i Dr. Hèctor Monclús Sales

**Dimarts 11 de desembre de 2018 a les 9:30h**

Sala de Graus de la Facultat de Ciències de la Universitat de Girona

## Abstract

Referred to as integrated membrane systems (IMS), the combination of two membranes coupled in series is a standard technology to produce reclaimed water of high quality for potable or industrial applications. Despite the widespread experience gained utilizing IMS, there are still some aspects which require further investigation, such as the fate of compounds of emerging concern (CEC), the control of *N*-Nitrosodimethylamine (NDMA) formation, the energy demand and the total cost of producing the reclaimed water, and monitoring membrane integrity in reverse osmosis (RO). [Julian Mamo](#)'s doctoral thesis has investigated a component of these aspects in a MBR-RO/NF process, i.e. membrane bioreactor followed by reverse osmosis/nanofiltration. The work also discusses whether a decision support system (DSS) for the online monitoring and operation would improve the current state-of-the-art of IMS.

**The fate of pharmaceuticals and their transformation products** – Pharmaceuticals are often excreted from the human body at much higher concentrations than the corresponding parent chemical and can themselves be pharmacologically active. For this reason, the thesis has investigated the fate of a number of pharmaceuticals and, particularly, their main human metabolites through the IMS process. The results show that the two consecutive membrane processes, when seen as a whole, become a highly efficient process to remove all the studied compounds. Additionally, when comparing the removal efficiencies of the RO and NF membranes, as expected, the RO membrane showed near complete removal rates (>99%), whereas the NF membrane resulted also in high removal efficiencies (> 90%).

**The control of N-Nitrosodimethylamine (NDMA) formation** - Removal of nitrosamines by RO and NF membranes is quite poor. On the other hand, using UV as a last step in a treatment train to remove these compounds is costly in terms of energy demand. This thesis focused on the removal of NDMA formation potential and individual precursors under nitrifying and non-nitrifying conditions (achieved by changing the aeration conditions of the bioreactor). The work also looked at the removal of NDMA formation potential and individual precursors by using an NF membrane to understand whether an NF membrane would provide a high enough rejection of NDMA to achieve potable reclaimed water quality standards. The results showed that during normal aerobic operation, implying a fully nitrifying system, the MBR pilot plant was able to reduce NDMA formation potential above 94%; however, this removal percentage decreased to values as low as 72% when changing the conditions to avoid nitrification. These results suggest that a fully nitrifying MBR system will support better removal of NDMA precursors during wastewater reclamation.

**The reduction of operational costs** - Unlike seawater RO systems, where systems operate with rather constant salinity and temperature, wastewater shows diurnal variations, which are catchment dependant. Julian Mamo explored whether these diurnal variations in wastewater quality, in terms of inorganic constituents and temperature, would justify the modification of RO process conditions (in terms of system recovery and pre-treatment dosing) to minimise the operational cost while considering the control of membrane fouling. The results showed that although there are limitations to the use of electrical conductivity (EC) as a main parameter to deduce the individual ionic constituents in wastewater, given the right assumptions, it is possible to obtain a useful profile for a particular EC value which could be used in an online / real-time optimisation system. Through the presentation of a case study considering the cost of energy and pre-treatment chemicals, the thesis showed that there is room for online optimisation tool in terms of associating a cost to the current operating process conditions and then questioning whether there is a more cost-effective way to 'set' the system.

**Better monitoring and membrane characterisation** - The way EC sensors, which are found in any RO/NF system, are currently utilised does not provide much information to the operator in terms of membrane integrity monitoring. This thesis explored the limits of detection of membrane integrity methods using EC sensors and provides a number of strategies improve the characterisation of membrane integrity.

**Decision Support Systems** - All previous results were brought into a discussion aimed at providing a joint framework with an initial rule-base for a knowledge-based decision support system for the real-time control of integrated membrane systems for wastewater reclamation.

To sum up, the doctoral thesis, entitled "**Assessment and optimization of the operation of integrated membrane systems for wastewater reclamation**" is a significant step forward to better understand the physical and chemical mechanisms of wastewater treatment in integrated membrane systems MBR-RO/NF and optimise its operation. Directed by Drs **Joaquim Comas**, **Ignasi Rodríguez-Roda** and **Hèctor Monclús**, it boosts LEQUIA research lines on membrane technologies and decision support systems for water treatment. The defence, which is open to the public, will take place on December 11<sup>th</sup> at 9:30h, at UdG the Faculty of Sciences -Sala de Graus (Campus Montilivi, carrer Maria Aurèlia Capmany 69, Girona).

## Resum

La combinació de dues membranes en sèrie és una tecnologia estàndard per produir aigua d'alta qualitat, potable o per aplicacions industrials. S'anomena "sistemes integrats de membrana" (en anglès, *integrated membrane systems* o IMS). Tot i l'actual proliferació dels IMS, encara cal més recerca en aspectes com ara el destí final dels contaminants emergents (en anglès, *compounds of emerging concern* o CEC), el control de la N-nitrosodimetilamina (NDMA), la demanda d'energia i el cost total de producció d'aigua regenerada, i la monitorització de la integritat de la membrana en osmosi inversa (RO). La tesi doctoral de [Julian Mamo](#) ha investigat un element de cadascun d'aquests aspectes en un procés de MBR-RO/NF, és a dir, un bioreactor de membrana acoblat amb un procés d'osmosi inversa/nanofiltraació, i ha obtingut resultats rellevants. També ha explorat si un sistema d'ajuda a la decisió (DSS) per la monitorització en línia de l'operació d'aquesta tecnologia milloraria l'actual estat de l'art dels IMS.

**El destí dels productes farmacèutics i els seus productes de transformació** – Els productes farmacèutics sovint són excretats del cos humà a molt més altes concentracions que el seu corresponent compost mare i romanen farmacològicament actius. Així, la tesi ha estudiat el destí d'un nombre de productes farmacèutics i dels metabolits humans principals en el procés IMS. Els resultats mostren que dos processos de membranes consecutius, si es consideren globalment, són molt més eficients a l'hora d'eliminar aquests compostos. A més a més, si comparem les eficiències d'eliminació de les membranes de RO i NF, les de RO presenten un rati d'eliminació gairebé total (> 99%); mentre que el de les membranes de nanofiltraació és superior al 90%.

**El control de la formació de N-Nitrosodimetilamina (NDMA)** – L'eliminació de nitrosamines per membranes de RO i NF és molt limitada. L'aplicació de rajos ultraviolats en la darrera fase del tren de tractament és també molt costosa a causa de la gran demanda energètica que comporta. Aquesta tesi s'ha centrat, doncs, en l'eliminació del potencial de formació de NDMA i dels seus precursors individuals en condicions nitrificants i no-nitrificants (assolides en canviar les condicions d'aeració del bioreactor). També ha estudiat l'eliminació del potencial de formació de NDMA i dels seus precursors individuals per mitjà d'una membrana NF a fi a i a efecte de valorar si aquesta podria aportar un rati de rebuig de NDMA suficient per assolir els estàndards de qualitat que s'exigeixen a l'aigua regenerada. Els resultats indiquen que durant l'operació anaeròbia normal, amb un sistema totalment nitrificant, la planta pilot de MBR pot reduir el potencial de formació de NDMA per sota del 94%; tot i així, el percentatge d'eliminació decreix fins al 72% en canviar les condicions per evitar la nitrificació. Això demostra que un sistema MBR totalment nitrificant afavoreix una millor eliminació dels precursors de NDMA durant el procés de regeneració d'aigua residual.

**La reducció dels costos operacionals** – A diferència dels sistemes RO de dessalinització, en què la temperatura i la salinitat són bastant constants, l'aigua residual mostra variacions diürnes clarament dependents de la captació. Julian Mamo ha investigat si aquestes variacions, pel que fa a constituents inorgànics i temperatura, justificarien la modificació de condicions d'un procés RO (en concret, la recuperació del sistema i la dosificació en el pre-tractament) per tal de minimitzar el cost operacional tot considerant el control del *fouling* de la membrana. Tot i que hi ha limitacions en l'ús de la conductivitat elèctrica (EC) com a paràmetre principal per a deduir els constituents iònics individuals en aigua residuals, amb les assumpcions correctes és possible obtenir un perfil útil de EC que podria ser emprat en un sistema d'optimització a temps real. A través de la presentació d'un estudi de casos considerant el cost energètic i dels productes químics de pre-tractament, la tesi demostra que hi ha espai per a desenvolupar una eina d'optimització en línia que associi un cost a les diferents condicions d'operació del procés i després qüestionari si hi ha una manera més eficient d'ajustar el sistema.

**Millor monitorització i caracterització de les membranes** – La manera en què els sensors EC, que es troben en qualsevol sistema RO/NF, s'estan utilitzant actualment no aporta gaire informació a l'operador pel que fa a la monitorització de la integritat de la membrana. Aquesta tesi investiga els límits de detecció de la integritat de la membrana emprant sensors EC i ens dona estratègies per a millorar la caracterització de la integritat de la membrana.

**Sistemes d'Ajuda a la Decisió** – Tots els resultats previs s'han incorporat a una discussió per desenvolupar un DSS per al control integrat de IMS per a la regeneració d'aigua residual.

En definitiva, la tesi doctoral "**Assessment and optimization of the operation of integrated membrane systems for wastewater reclamation**" constitueix un pas significatiu per avançar vers una millor comprensió dels mecanismes físics i químics implicats en el tractament d'aigües residuals amb un sistema MBR-RO/NF i optimitzar així la seva operació. Dirigida pels Drs. **Joaquim Comas**, **Ignasi Rodriguez-Roda** i **Hèctor Monclús**, la tesi impulsa i reforça les línies de recerca del grup LEQUIA en tecnologia de membranes i DSS per al tractament d'aigua residual. La defensa, que està oberta al públic, tindrà lloc el proper dimarts 11 de desembre a les 9:30h, a la Facultat de Ciències de la Universitat de Girona, a la Sala de Graus (Campus Montilivi, carrer Maria Aurèlia Capmany 69, Girona).

## Resumen

La combinación de dos membranas en serie es una tecnología estándar para producir agua de alta calidad, potable o para aplicaciones industriales. Se conoce como “sistemas integrados de membrana” (en inglés, *integrated membrane systems* o IMS). A pesar de la actual proliferación de los IMS, aún se precisa de más investigación en aspectos como el destino final de los contaminantes emergentes (en inglés, *compounds of emerging concern*), el control de la N-nitrosodimetilamina (NDMA), la demanda de energía y el coste total de producción de agua regenerada, y la monitorización de la integridad de la membrana en ósmosis inversa (RO). La tesis doctoral de [Julian Mamo](#) ha investigado un elemento de cada uno de estos aspectos en un proceso de MBR-RO/NF, es decir, un bioreactor de membrana acoplado con un proceso de ósmosis inversa o nanofiltración, obteniendo resultados relevantes. También ha estudiado si un sistema de ayuda a la decisión (DSS) para la monitorización en línea de la operación de esta tecnología mejoraría el actual estado del arte de los IMS.

**El destino de los productos farmacéuticos y sus productos de transformación** – Los productos farmacéuticos son excretados del cuerpo humano a concentraciones mucho más altas que su compuesto madre permaneciendo farmacológicamente activos. Por ello, la tesis se ha centrado en el destino de distintos productos farmacéuticos así como en los principales metabolitos humanos en el proceso IMS. Los resultados muestran que dos procesos de membranas consecutivos, considerados globalmente, son mucho más eficaces para eliminar estos compuestos. Si comparamos las eficiencias de alimentación de las membranas de RO y NF, las de RO presentan un ratio de eliminación casi total (>99%), mientras que el de las membranas de nanofiltración es superior al 90%.

**El control de la formación de N-Nitrosodimetilamina (NDMA)** – La eliminación de nitrosaminas por membranas de RO y NF es muy limitada. La aplicación de rayos ultravioletas en la última fase del tratamiento es también muy costosa a causa de la gran demanda energética que conlleva. Esta tesis se ha focalizado, pues, en la eliminación del potencial de formación de NDMA y de sus precursores individuales en condiciones nitrificantes y no-nitrificantes (logradas al cambiar las condiciones de aeración del bioreactor). También ha estudiado la eliminación del potencial de formación de NDMA y de sus precursores individuales por medio de una membrana NF con el fin de valorar si esta podría aportar un ratio de rechazo suficiente de NDMA para alcanzar los estándares de calidad que se exigen al agua regenerada. Los resultados indican que durante la operación anaerobia normal, con un sistema totalmente nitrificante, la planta piloto de MBR puede reducir el potencial de formación de NDMA por debajo del 94%; no obstante, el porcentaje de eliminación decrece hasta el 72% al cambiar las condiciones para evitar la nitrificación. Ello demuestra que un sistema MBR totalmente nitrificante favorece una mejor eliminación de los precursores de NDMA durante el proceso de regeneración de agua residual.

**La reducción de los costes operacionales** – A diferencia de los sistemas RO de desalinización, en que la temperatura y la salinidad se mantienen más o menos constantes, el agua residual muestra variaciones diurnas claramente dependientes de la captación. Julian Mamo ha investigado si estas variaciones, en cuanto a constituyentes inorgánicos y temperatura se refiere, justificarían la modificación de condiciones de un proceso RO (en concreto, la recuperación del sistema y la dosificación en el pre-tratamiento) con el fin de minimizar el coste operacional considerando el control del *fouling* de la membrana. A pesar de que hay limitaciones en el uso de la conductividad eléctrica (EC) como parámetro principal para deducir los constituyentes iónicos individuales en aguas residuales, con las asunciones correctas es posible obtener un perfil útil de EC que podría ser utilizado en un sistema de optimización a tiempo real. A través de la presentación de un estudio de casos considerando el coste energético y de los productos químicos de pre-tratamiento, la tesis demuestra que hay espacio para desarrollar una herramienta de optimización en línea que asocie un coste a las distintas condiciones de operación del proceso y después cuestione si hay una forma más eficiente de ajustar el sistema.

**Mejor monitorización y caracterización de membranas** – La forma en que los sensores EC, que se hallan en cualquier sistema RO/NF, se están utilizando actualmente, no aporta mucha información en cuanto a la monitorización de la integridad de la membrana. Esta tesis investiga los límites de detección de la integridad de la membrana utilizando sensores EC y nos ofrece estrategias para mejorar la caracterización de la integridad de la membrana.

**Sistemas de Ayuda a la Decisión** – Todos los resultados se han incorporado a una discusión sobre un DSS para el control integrado de IMS de regeneración de agua residual.

En suma la tesis doctoral “**Assessment and optimization of the operation of integrated membrane systems for wastewater reclamation**” constituye un paso adelante para avanzar hacia una mejor comprensión de los mecanismos físicos y químicos implicados en el tratamiento de aguas residuales con un sistema MBR-RO/NF y optimizar así su operación. Dirigida por los Dres. **Joaquim Comas**, **Ignasi Rodríguez-Roda** y **Hèctor Monclús**, impulsa las líneas de investigación del grupo LEQUIA en tecnología de membranas y DSS para el tratamiento de agua residual. La defensa, que está abierta al público, tendrá lugar el próximo martes 11 de diciembre a las 9:30h en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Girona, en la Sala de Grados (Campus Montilivi, carrer Maria Aurèlia Capmany 69, Girona).