

PhD dissertation by **Rajashree Yalamanchili**



Optimization of osmotic pressure usage for safe water production in the context of combining water reuse and desalination

Supervisors: Dr Gaëtan Blandin and Dr Ignasi Rodriguez-Roda

Jury members: Dr Andrea Achilli (University of Arizona), Dr François Zavisca (University of Montpellier) and Dr Alba Cabrera (University of Girona)

Wednesday 7th July 2026, 10:00h, UdG Faculty of Sciences (“Aula Magna”)

Carrer M^a Aurèlia Capmany 69, Campus Montilivi, 17003 Girona

Abstract

Growing water scarcity continues to push regions around the world to look out for alternative water resources such as seawater desalination and wastewater reuse. While desalination by reverse osmosis (RO) provides a reliable supply, it remains constrained by high specific energy consumption and the environmental impacts of brine disposal. At the same time, discharge of treated wastewater is a missed opportunity for water reuse and resource recovery. In this context, a forward osmosis-reverse osmosis (FO–RO) hybrid system that simultaneously dilutes seawater and pre-concentrates wastewater, is envisioned to lower the energy intensity of desalination while enhancing water and resource recovery from wastewater.

This thesis demonstrated, through modelling and design approaches, that by optimizing osmotic dilution processes, it is possible to achieve wastewater recovery as high as 90% in FO while reducing RO desalination energy below 1 kWh/m³. Furthermore, processing diluted seawater in an existing desalination plant showed feasibility to retrofit to FO-RO hybrid and also enhance permeate production as high as 67%. However, when comparing FO-RO hybrid with independent schemes energetically, standalone water reuse remained attractive. Beyond these valuable findings, the work also showed that integrating FO as a concentration step hinges on understanding how hydraulic conditions, flow orientation, module arrangement, and intrinsic FO mass-transfer limitations shape the achievable recovery and proximity to osmotic equilibrium. Insights from combined pilot-scale experiments and modelling revealed that a tree-shaped, multi-module configuration operated in counter-current flow promotes more balanced hydraulic distribution and maintains the osmotic driving force more effectively than a simple series layout.

Having established the potential of FO-RO hybrid systems, Rajashree Yalamanchili's thesis then turned to broader questions: Is the water produced suitable for safe reuse? And, what is the resource-recovery potential when the FO-pre-concentrated wastewater is integrated with downstream biological processes such as anaerobic digestion (AD) and microalgae? Employing literature-based modelling, the hybrid system showed potential to reach RO recovery as high as 80-82% under varying operating conditions. Moreover, the RO permeate satisfied relevant agricultural guidelines, although it would require more advanced disinfection steps to meet drinking-water standards and reduce ammonium and pathogen log-removal values. With FO pre-concentration, the impacts of elevated salinity and ammonium on downstream biological processes (AD and microalgae systems) need further experimental validation, as both parameters may influence process stability and productivity. Even when the system is powered using energy generated from AD, standalone water reuse remains a low-energy option, although methane losses in the absence of pre-concentration could limit the net energy gains.

Finally, the researcher focused on the removal of contaminants of emerging concern. In a FO-RO-AD hybrid system, FO achieves high initial rejection, but persistent and recalcitrant compounds accumulate in the anaerobic digestion effluent due to limited biodegradation. On the seawater side, osmotic dilution combined with RO's high rejection ensures consistently high-quality permeate, with residual contaminants confined to the RO brine. Operational variations mainly affect contaminants of emerging concern levels in the anaerobic digestion effluent, while permeate quality remains stable. Overall, compared to standalone seawater RO and AD–RO trains, the FO–RO–AD hybrid delivers the lowest concentrations of contaminants of emerging concern in permeate and brine, while concentrating the highest load in the AD effluent, which requires appropriate management.

Altogether, the thesis gathers new scientific-technical knowledge on integrating water reuse and desalination through FO-RO hybrid systems for safe water reuse. It also identifies relevant operational parameters and processes that should be studied in future research works. Directed by Dr Gaëtan Blandin and Dr Ignasi Rodriguez-Roda, the work aligns with ongoing research on membrane technologies for sustainable water treatment at LEQUIA research group of the University of Girona.

Main publications: (1) Rajashree Yalamanchili et al, Can a forward osmosis-reverse osmosis hybrid system achieve 90 % wastewater recovery and desalination energy below 1 kWh/m³? A design and simulation study, *Desalination*, 585, 2024, 117767, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117767>. (2) Rajashree Yalamanchili et al, Single-pass forward osmosis for efficient feed concentration: Optimizing multiple modules arrangement and flow distribution, *Desalination*, 615, 2025, 119224, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119224>

Resum

L'escassetesa d'aigua continua empenyent regions de tot el món a cercar recursos hídrics alternatius, com ara la dessalinització d'aigua de mar i la reutilització d'aigua residual. Si bé la dessalinització per osmosi inversa subministra aigua de manera fiable, continua estant limitada per l'alt consum d'energia específic i els impactes ambientals de l'eliminació de salmorra. Alhora, l'abocament d'aigües residuals tractades és una oportunitat perduda per a la seva reutilització i la recuperació de recursos. En aquest context, es proposa un sistema híbrid d'osmosi directa-osmosi inversa (OD-OI) capaç de diluir l'aigua de mar i pre-concentrar les aigües residuals de manera simultània, tot reduint la intensitat energètica de la dessalinització, i augmentant la recuperació d'aigua i de recursos de les aigües residuals.

Aquesta tesi va demostrar, mitjançant enfocaments de modelització i de disseny, que optimitzant els processos de dilució osmòtica és possible aconseguir una recuperació d'aigües residuals de fins al 90% en processos d'osmosi directa i reduir l'energia de dessalinització d'osmosi inversa per sota d'1 kWh/m³. Un altre resultat rellevant és la viabilitat de processar aigua de mar diluïda en una planta dessalinitzadora existent per a millorar el sistema híbrid OD-OI i augmentar així la producció de permeat fins al 67%. Tot i així, quan es compara energèticament el procés OD-OI amb esquemes independents, la reutilització autònoma de l'aigua continua essent atractiva. Més enllà d'aquestes valuoses troballes, el treball també demostra que la integració de l'osmosi directa com a etapa de concentració prèvia depèn de la comprensió de les condicions hidràuliques, l'orientació del flux, la disposició dels mòduls i les limitacions intrínseques de transferència de massa; factors que determinen la recuperació que es pot assolir i la proximitat a l'equilibri osmòtic. Així, la combinació d'experiments a escala pilot i de modelització va revelar que una configuració multi-modular en forma d'arbre que opera en flux a contracorrent promou una distribució hidràulica més equilibrada i manté la força motriu osmòtica de manera més eficaç que una disposició en sèrie.

Un cop establert el potencial dels sistemes híbrids OD-OI, la tesi de Rajashree Yalamanchili es va centrar en preguntes més àmplies: L'aigua produïda és segura per a la reutilització? I quin és el potencial de recuperació quan les aigües residuals pre-concentrades de l'OD s'integren amb processos biològics com ara la digestió anaeròbica (DA) i les microalgues? Mitjançant models basats en la literatura, el sistema híbrid va mostrar un potencial de recuperació en la OI de fins al 80-82% a diferents condicions de funcionament. A més, el permeat de l'OI compleix amb les directrius per a reg agrícola, tot i que requeriria dur a terme etapes de desinfecció més avançades per complir amb la normativa d'aigua potable i reduir els valors d'eliminació logarítmica d'amoni i patògens. Amb la preconcentració de l'OD, els impactes de la salinitat elevada i l'amoni en els processos biològics posteriors (sistemes de DA i microalgues) necessiten ser validats experimentalment, ja que ambdós paràmetres poden influir en l'estabilitat i la productivitat del procés. Tanmateix, fins i tot quan el sistema s'alimenta amb energia generada a partir de DA, la reutilització d'aigua continua sent una opció de baix consum energètic, tot i que les pèrdues de metà en absència de pre-concentració podrien limitar els guanys energètics nets.

Finalment, la investigadora es va centrar en l'eliminació de contaminants emergents. En un sistema híbrid OD-OI-DA, l'OD aconsegueix un alt rebuig inicia d'aquestes substàncies, però els compostos persistents i recalitrants s'acumulen a l'efluent de digestió anaeròbica a causa d'una biodegradació limitada. Pel que fa a l'aigua de mar, la dilució osmòtica combinada amb l'alt rebuig de l'OI garanteix un permeat d'alta qualitat sostinguda, amb contaminants residuals confinats a la salmorra. Les variacions operatives afecten principalment els nivells dels contaminants emergents a l'efluent de digestió anaeròbica, mentre que la qualitat del permeat es manté estable. En general, en comparació amb els trens autònoms d'OI i AD-OI, el sistema híbrid OD-OI-DA proporciona les concentracions més baixes de contaminants emergents en el permeat i la salmorra, alhora que concentra la càrrega més alta a l'efluent de la AD, la qual cosa que requereix d'una gestió adequada.

En conjunt, la tesi aporta nous coneixements científico-tècnics sobre la integració de la reutilització i la dessalinització mitjançant sistemes híbrids OD-OI per a una reutilització segura de l'aigua. També identifica paràmetres i processos operatius rellevants que s'haurien d'estudiar en treballs de recerca futurs. Dirigida pel Dr. Gaëtan Blandin i el Dr. Ignasi Rodriguez-Roda, la tesi s'alinea amb la recerca actual sobre tecnologies de membranes per al tractament sostenible d'aigües al grup de recerca LEQUIA de la Universitat de Girona.

Main publications: (1) Rajashree Yalamanchili et al, Can a forward osmosis-reverse osmosis hybrid system achieve 90 % wastewater recovery and desalination energy below 1 kWh/m³? A design and simulation study, *Desalination*, 585, 2024, 117767, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117767>. (2) Rajashree Yalamanchili et al, Single-pass forward osmosis for efficient feed concentration: Optimizing multiple modules arrangement and flow distribution, *Desalination*, 615, 2025, 119224, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119224>

Resumen

La escasez de agua sigue empujando a regiones de todo el mundo a buscar recursos hídricos alternativos, como la desalinización de agua de mar y la reutilización de aguas residuales. Si bien la desalinización por ósmosis inversa suministra agua de forma fiable, sigue estando limitada por el alto consumo de energía específico y los impactos ambientales de la eliminación de salmuera. Asimismo, el vertido de aguas residuales tratadas es una oportunidad perdida para la reutilización del agua y la recuperación de recursos. En este contexto, se propone un sistema híbrido de ósmosis directa-ósmosis inversa (OD-OI) capaz de diluir el agua de mar y pre-concentrar las aguas residuales de forma simultánea, reduciendo así la intensidad energética de la desalinización y aumentando la recuperación de agua y de recursos de las aguas residuales.

Esta tesis demostró, mediante enfoques de modelización y diseño, que optimizando los procesos de dilución osmótica es posible conseguir una recuperación de aguas residuales de hasta el 90% en OD y reducir la energía de desalinización de ósmosis inversa por debajo de 1 kWh/m³. Otro resultado relevante es la viabilidad de procesar agua de mar diluida en una planta desalinizadora existente para mejorar el sistema híbrido OD-OI y aumentar así la producción de permeado hasta el 67%. Sin embargo, cuando se compara energéticamente el proceso OD-OI con esquemas independientes, la reutilización autónoma del agua sigue siendo atractiva. Más allá de estos valiosos hallazgos, el trabajo también demuestra que la integración de la OD como etapa de concentración previa depende de la comprensión de las condiciones hidráulicas, la orientación del flujo, la disposición de los módulos y las limitaciones intrínsecas de transferencia de masa; factores que determinan la recuperación que puede alcanzarse y la proximidad al equilibrio osmótico. Así, la combinación de experimentos a escala piloto y de tareas de modelización reveló que una configuración multimodular en forma de árbol que opera en flujo a contracorriente promueve una distribución hidráulica más equilibrada y mantiene la fuerza motriz osmótica de forma más eficaz que una disposición en serie.

Una vez establecido el potencial de los sistemas híbridos OD-OI, la tesis de Rajashree Yalamanchili se centró en preguntas más amplias: ¿es segura el agua producida para la reutilización? ¿Y cuál es el potencial de recuperación cuando las aguas residuales pre-concentradas de la OD se integran con procesos biológicos como la digestión anaeróbica (DA) y las microalgas? Mediante modelos basados en la literatura, el sistema híbrido mostró un potencial de recuperación en la OD de hasta el 80-82% bajo distintas condiciones de funcionamiento. Además, el permeado de la OD cumple con las directrices para riego agrícola, aunque requeriría etapas de desinfección más avanzadas para cumplir con la normativa de agua potable y reducir los valores de eliminación logarítmica de amonio y patógenos. Con la pre-concentración de la OD, los impactos de la elevada salinidad y el amonio en los procesos biológicos posteriores (sistemas de DA y microalgas) necesitan ser validados experimentalmente, ya que ambos parámetros pueden influir en la estabilidad y la productividad del proceso. Sin embargo, incluso cuando el sistema se alimenta con energía generada a partir de DA, la reutilización de agua sigue siendo una opción de bajo consumo energético, aunque las pérdidas de metano en ausencia de pre-concentración podrían limitar las ganancias energéticas netas.

Por último, la investigadora se centró en la eliminación de contaminantes emergentes. En un sistema híbrido OD-OI-DA, la OD consigue un alto rechazo inicial, pero los compuestos persistentes y recalcitrantes se acumulan en el efluente de digestión anaeróbica a causa de una biodegradación limitada. En cuanto al agua de mar, la dilución osmótica combinada con el alto rechazo de la OI garantiza un permeado de alta calidad sostenida, con contaminantes residuales confinados en la salmuera. Las variaciones operativas afectan principalmente a los niveles de los contaminantes emergentes en el efluente de digestión anaeróbica, mientras que la calidad del permeado se mantiene estable. Por lo general, en comparación con los trenes autónomos de OI y DA-OI, el sistema híbrido OD-OI-DA proporciona las concentraciones más bajas de contaminantes emergentes en el permeado y la salmuera, concentrando a la vez la carga más alta en el efluente de la DA, lo que requiere una gestión adecuada.

En conjunto, la tesis aporta nuevos conocimientos científico-técnicos sobre la integración de la reutilización y desalinización mediante sistemas híbridos OD-OI para una reutilización segura del agua. También identifica parámetros y procesos operativos relevantes que deberían estudiarse en futuros trabajos de investigación. Dirigida por el Dr. Gaëtan Blandin y el Dr. Ignasi Rodríguez-Roda, la tesis se alinea con la investigación actual sobre tecnologías de membranas para el tratamiento de aguas en el grupo de investigación LEQUIA de la Universidad de Girona.

Publicaciones principales: (1) Rajashree Yalamanchili et al, Can a forward osmosis-reverse osmosis hybrid system achieve 90 % wastewater recovery and desalination energy below 1 kWh/m³? A design and simulation study, *Desalination*, 585, 2024, 117767, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117767>. (2) Rajashree Yalamanchili et al, Single-pass forward osmosis for efficient feed concentration: Optimizing multiple modules arrangement and flow distribution, *Desalination*, 615, 2025, 119224, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119224>