



Francesca Macedonio, Enrico Drioli  
Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali  
Università della Calabria  
e.drioli@unical.it

## SISTEMI INTEGRATI A MEMBRANA

# PER LA DISSALAZIONE DELLE ACQUE

*Attualmente i processi di dissalazione a membrana, e in particolare l'osmosi inversa, rappresentano il contributo più promettente per risolvere la crisi idrica mondiale. Ne è prova il fatto che, ogni giorno, in tutto il mondo, vengano prodotti circa 31,4 milioni di m<sup>3</sup> di acqua dissalata tramite queste tecnologie. Lo sviluppo dell'ingegneria delle membrane permetterà di migliorare ulteriormente l'efficienza di tali processi, aumentandone il fattore di recupero, riducendo il costo dell'acqua dissalata prodotta e, soprattutto, consentendo di rendere tali processi più sostenibili, minimizzandone anche l'impatto sull'ambiente. Ciò può essere realizzato tramite l'integrazione di processi a membrana diversi ma tra di loro complementari.*

L'acqua costituisce a tutti gli effetti un bene primario e insostituibile per qualunque essere vivente, l'elemento chiave per lo sviluppo di qualsiasi società, sia rurale (dove è fondamentale il suo utilizzo come acqua potabile e per l'irrigazione), sia industriale (dove viene spesso utilizzata come acqua di processo). La riserva mondiale di acqua dolce, quella in grado di fronteggiare le necessità umane, agricole e industriali, è tuttavia pari a circa il 2,5% delle risorse idriche del mondo, e di queste solo

l'1% (ossia lo 0,01% di tutta l'acqua della terra) può essere effettivamente utilizzata per gli uomini e per gli ecosistemi, dato che la restante parte è presente o sotto forma di ghiaccio polare, laghi, riserve naturali e fiumi, oppure è costituita da acque di strati sotterranei non ancora intensivamente sfruttati (Fig. 1).

Se a tutto ciò si aggiunge da una parte il crescente consumo medio pro-capite (aumentato di circa sei volte negli ultimi 100 anni e che si prevede raddoppierà entro il 2050), dall'altra il pro-

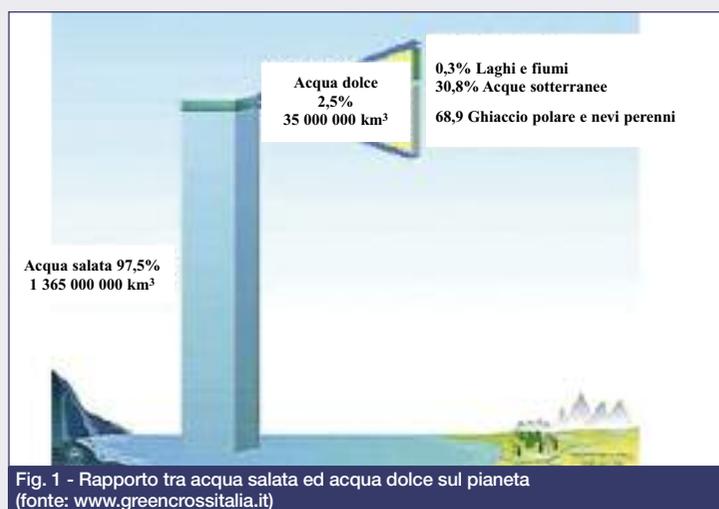


Fig. 1 - Rapporto tra acqua salata ed acqua dolce sul pianeta (fonte: www.greencrossitalia.it)

gressivo deteriorarsi della qualità delle risorse idriche attualmente disponibili a causa della continua crescita della popolazione e dello sviluppo turistico e industriale, e da un'altra parte ancora la sproporzione tra distribuzione geografica delle sorgenti di acqua e popolazione residente, si prospetta una situazione molto difficile per i prossimi anni. Per vincere la crisi idrica sarà necessario un utilizzo e riutilizzo più razionale delle acque, accompagnato da un incremento significativo delle risorse idriche attraverso dissalazione delle acque saline e salmastre.

Negli ultimi decenni la desalinazione dell'acqua salina e salmastra è senza dubbio emersa come il processo più promettente per la produzione di acqua potabile.

Secondo quanto riportato nell'edizione 2008-2009 del *IDA's Desalination Yearbook*, a fine giugno 2008 circa 62,8 milioni di m<sup>3</sup> di acqua dissalata venivano prodotte ogni giorno nei 13.869 impianti di dissalazione sparsi in tutto il mondo, circa il 6% in più rispetto al totale degli impianti dell'anno precedente. Quello che ci si aspetta è un continuo aumento degli impianti di dissalazione, fino ad arrivare nel 2016 a 107 milioni m<sup>3</sup> di acqua dissalata al giorno.

Per quanto riguarda poi la tecnologia adottata negli impianti di dissalazione, l'80% di questi utilizzano già processi a membrana (il 90% dei quali proprio l'osmosi inversa) e forniscono circa il 50% della quantità totale di acqua dissalata [1].

La dissalazione tramite osmosi inversa (RO) apparve nel mercato solo alla fine degli anni Sessanta quando il processo di produzione delle membrane divenne sufficientemente efficiente da produrre acqua dissalata a prezzi concorrenziali rispetto a quelli dei più tradizionali e maturi processi di dissalazione termici. Negli ultimi decenni si è poi assistito a



Fig. 2 - Moduli di osmosi inversa (a) utilizzati nell'impianto di dissalazione (b) di Ashkelon - Israele (fonte: www.water-technology.net/projects/israel/)

una notevolissima espansione della tecnologia a membrana nel campo della dissalazione. Il successo di tale tecnologia, e in particolare dell'osmosi inversa, rispetto ai convenzionali processi termici è dovuto al più alto fattore di recupero, all'inferiore consumo energetico e al più basso costo unitario dell'acqua dissalata prodotta (Tab. 1).

Attualmente, il più grande impianto di dissalazione di acqua di mare ad osmosi inversa è quello di Ashkelon (Israele), che produce più di 100 milioni di m<sup>3</sup> di acqua dissalata all'anno ad un costo di 0,527 \$/m<sup>3</sup> (Fig. 2). Per quanto riguarda invece la dissalazione di acqua salmastra, il più grande impianto di osmosi inversa del mondo è quello di Wadi Ma'in in Giordania, che opera con una capacità massima giornaliera di oltre 150.000 m<sup>3</sup> [2].

Uno degli obiettivi principali degli attuali processi industriali è quello di garantirne la *sostenibilità*. Il proliferare degli impianti di dissalazione contribuisce difatti ad alleviare il problema della carenza di acqua nel mondo ma, contemporaneamente, potrebbe causare impatti negativi sull'ambiente. In particolare la produzione di concentrati salini che necessitano di essere smaltiti e che, spesso,

Tab. 1 - Confronto tra processi di dissalazione termici e a membrana

Processi termici di dissalazione dell'acqua di mare. Dati riferiti a distillazione a Flash Multi-Stage (MSF) e a distillazione a Multi-Effetto (MED)	Processi a membrana (RO) per la dissalazione dell'acqua di mare
Acqua dissalata con bassa concentrazione di solidi disciolti (10-20 ppm)	Acqua dissalata con concentrazione totale di solidi disciolti tra 100 e 550 ppm
Consumo di energia termica = 12 kWh/m <sup>3</sup> (dati per MSF) <sup>A</sup>	Consumo di energia termica = 0
Consumo di energia (MSF) <sup>B</sup> = 17 ÷ 18 kWh/m <sup>3</sup>	Consumo di energia <sup>C, D, E</sup> = 2,2 ÷ 6,7 kWh/m <sup>3</sup>
Fattore di recupero ≈ 10%	Fattore di recupero <sup>F, A</sup> ≈ 40 ÷ 60A%
Costo dell'acqua dissalata <sup>F, A</sup> ≈ 0,9 ÷ 1,4 \$/m <sup>3</sup> (MSF) ÷ 2,34 \$/m <sup>3</sup> (MED)	Costo dell'acqua dissalata ≈ 0,50 ÷ 0,70 \$/m <sup>3</sup> (per la maggior parte degli impianti di dissalazione di acqua di mare <sup>D, G</sup> ) e 0,36 \$/m <sup>3</sup> (per la dissalazione di acqua salmastra) <sup>A, H</sup>

<sup>A</sup>C. Fritzmann, *Desalination*, 2007, **216**, 1

<sup>B</sup>The *International Desalination & Water Reuse*, Nov./Dec. 2008, **18**(3)

<sup>C</sup>W.J. Koros, *AIChE Journal*, October 2004, **50**(10), 2326

<sup>D</sup>www.water-technology.net/projects/israel/specs.html (2008)

<sup>E</sup>*Water Desalination Report*, 2008, **14**(12)

<sup>F</sup>Ettouney *et al.*, December 2002, 32, www.cepmagazine.org

<sup>G</sup>B. Van der Bruggen *et al.*, *Desalination*, 2002, **143**, 207

<sup>H</sup>El Paso Desalination Plant, Texas, www.epwu.org/167080115.html (2008)

# CHIMICA & TECNOLOGIA

vengono direttamente scaricati nelle acque superficiali o negli oceani è un crescente problema.

Gli attuali impianti di dissalazione scaricano infatti, nella maggior parte dei casi, gli stessi componenti dell'acqua del mare trattata, ma ad una temperatura e ad una concentrazione maggiore. La sensibilità dell'habitat marino al retentato scaricato varia da luogo a luogo e dipende sia dal volume e dalla metodologia utilizzata per scaricare il retentato (lunghezza del tubo di scarico insieme alla distanza dalla costa e alla profondità dal livello del mare, presenza o meno di un diffusore), sia da molti fattori ambientali e idrogeologici caratteristici del mare (quali onde e correnti) che determinano il grado di dispersione del retentato e l'efficienza di diluizione nel punto di scarico e, quindi, il potenziale impatto sull'ambiente. In generale, le alte concentrazioni e, di conseguenza, le alte densità provocano un inabissamento del retentato sul fondo del mare, creando un deserto salino in prossimità del tubo di scarico; inoltre gli agenti chimici aggiunti negli stadi di pre-trattamento contribuiscono a danneggiare la vita marina.

Il modo di soddisfare la crescente domanda di acqua sotto le limitazioni imposte dal concetto di *Sviluppo Sostenibile* è un problema complesso. Una possibile soluzione è offerta dall'impiego di operazioni a membrane le cui peculiarità soddisfano le richieste della *Process Intensification*. Quest'ultima è una strategia che ha come obiettivo quello di produrre il più possibile utilizzando il meno possibile [3], sostituendo quelle apparecchiature e quei processi costosi, inquinanti e con alti consumi energetici, con tecnologie innovative e all'avanguardia più economiche ed efficienti, meno inquinanti e compatte, più sicure ed automatizzate e con un più razionale utilizzo delle risorse naturali. Le operazioni a membrana rispondono efficientemente alle richieste della Process Intensification perché potenzialmente sono in grado di: 1) rimpiazzare i processi convenzionali caratterizzati da alti consumi energetici (quali distillazione ed evaporazione); 2) realizzare il trasporto selettivo ed efficiente di specifici componenti; 3) raggiungere livelli avanzati di automatismo e controllo remoto.

Grazie alle operazioni a membrana, gli obiettivi di continua riduzione dei costi e di miglioramento della qualità delle acque, nonché di incremento del fattore di recupero e di

riduzione dell'impatto ambientale degli impianti di dissalazione si possono raggiungere tramite l'integrazione di processi a membrana diversi ma tra di essi complementari, che permettano così di superare i limiti associati alle singole unità e di sfruttare gli effetti sinergici in termini di migliore rendimento del sistema globale. Per esempio, processi a membrana, quali la microfiltrazione (MF) e la ultrafiltrazione (UF) vengono sempre più utilizzati negli stadi di pre-trattamento all'osmosi inversa in sostituzione dei sistemi di pre-trattamento convenzionali, meno efficienti e che non rappresentano una barriera efficace nei confronti delle particelle colloidali e dei solidi sospesi contenuti nelle acque e responsabili dello sporco e del prematuro deterioramento delle membrane (Fig. 3).

Un significativo miglioramento nella realizzabilità della RO si può ottenere utilizzando anche la nanofiltrazione (NF) negli step di pre-trattamento. Quest'ultima possiede implicazioni sullo stesso processo di dissalazione e non solo sulla qualità dell'alimentazione: i microrganismi, la torbidità, la durezza e la maggior parte degli ioni multivalenti sono fortemente ridotti; le specie bivalenti ( $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  ecc.) vengono trattenute con elevate percentuali mentre permangono quelle monovalenti. Come conseguenza, la pressione osmotica della corrente in alimentazione alla RO viene diminuita, permettendo così all'unità di operare a pressione inferiore (richiedendo quindi meno energia) e a fattori di recupero alti senza problemi di incrostazioni. Accoppiando la NF con la RO, si possono ottenere fattori di recupero fino al 52% [4, 5], molto più alti di quelli di un tipico impianto costituito dalla sola RO (~40%) [6]. Inoltre, il sistema NF+RO è anche dal punto di vista ambientale migliore,

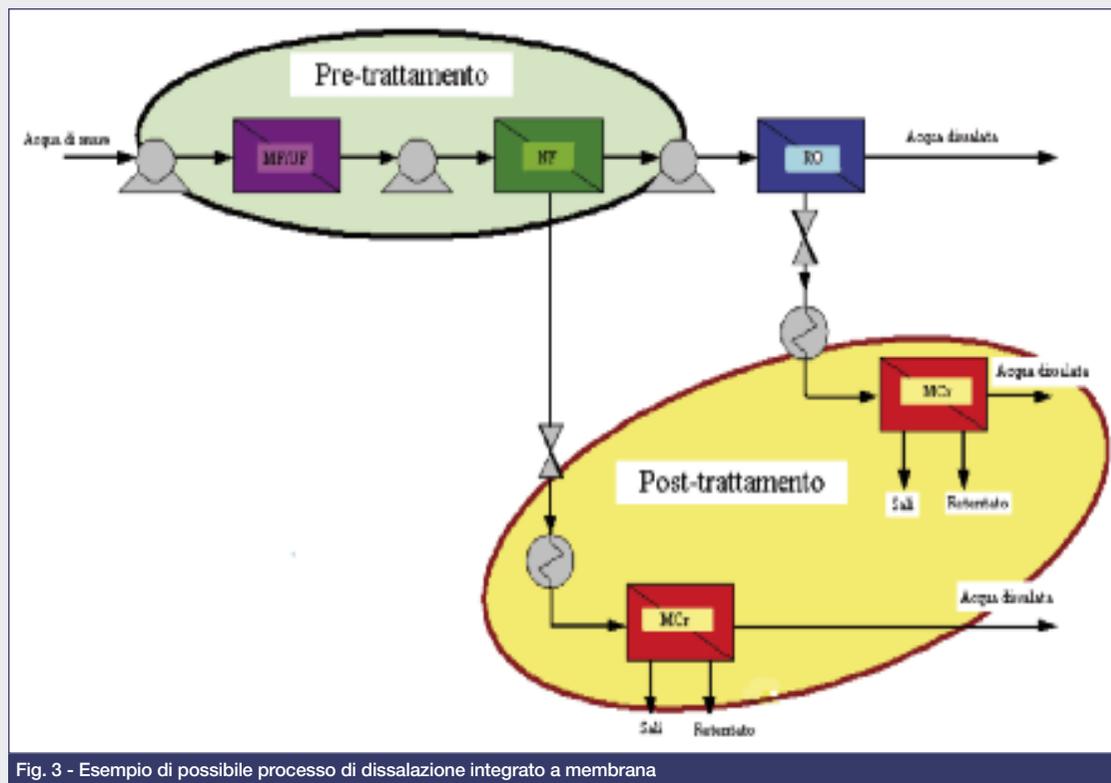


Fig. 3 - Esempio di possibile processo di dissalazione integrato a membrana

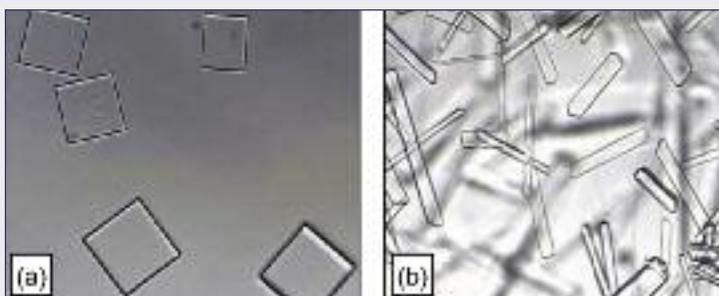


Fig. 4 - Cristalli (a) di cloruro di sodio (foto al microscopio ottico con ingrandimento 10x) e (b) di espomite (foto al microscopio ottico con ingrandimento 20x) ottenuti trattando il retentato della nanofiltrazione con la tecnica della cristallizzazione a membrana

non solo per la minore quantità di retentato scaricato (intorno al 48% della corrente in alimentazione), ma anche per la minore concentrazione di additivi utilizzati (anti-incrostanti e acidi) nei vari stadi del processo e, infine, scaricati nell'ambiente [7].

Attualmente viene studiato un altro processo a membrana per il pre-trattamento della RO, il Bioreattore a Membrana (MBR). Solitamente l'MBR viene utilizzato per il trattamento e riutilizzo delle acque di scarico poiché è in grado di produrre effluenti microbiologicamente puri e di alta qualità particolarmente adatti per essere riciclati. In *MEDINA* (acronimo di *Membrane-Based Desalination: An Integrated Approach*), uno dei progetti finanziati dalla Comunità Europea nell'ambito del Sesto Programma Quadro e coordinato da Enrico Drioli (Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali, Università della Calabria), il bioreattore a membrana è stato invece applicato per la rimozione di componenti organici antropogenici e di agenti sporcanti presenti nelle acque saline e salmastre. Nell'ambito di questo progetto un'intensa attività di ricerca ha riguardato anche il trattamento di concentrati degli impianti di dissalazione. In *MEDINA*, per ridurre la quantità di retentato scaricato nell'ambiente è stato testato l'utilizzo, sui retentati della RO e/o

della NF, di un nuovo processo quale la Cristallizzazione a Membrana (MCR). Questa, grazie alle sue caratteristiche intrinseche, consente di ottenere acqua a elevato grado di purezza anche da soluzioni altamente concentrate con le quali l'osmosi inversa non potrebbe operare a causa degli effetti osmotici. Pertanto, quando viene inserita sulle correnti di retentato, permette di sfruttarne il valore aggiunto, recuperando l'acqua e gli ioni in essi presenti, incrementando così la quantità di acqua dissalata globalmente prodotta dall'impianto assieme al recupero dei sali sotto forma di cristalli ad elevato grado di purezza (Fig. 4) [8-9].

In conclusione, la tecnologia a membrana offre oggi nuove possibilità per l'ottimizzazione e la razionalizzazione dei processi industriali. La possibilità di integrare le nuove operazioni a membrana (MBR, MCR) con gli oramai ben collaudati processi tipo MF, UF, NF, RO potrà contribuire a raggiungere gli obiettivi di miglioramento di qualità delle acque, riduzione del problema di sporcamento delle membrane, inferiore costo dell'acqua prodotta e ridotto impatto ambientale degli impianti di dissalazione.



### Bibliografia

- [1] V. Frenkel, *Desalination & Water Reuse*, 2008, **17**(4).
- [2] M.S. Mohsen, *Desalination*, 2007, **203**(1-3), 27.
- [3] J.-C. Charpentier, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2007, **46**, 3465.
- [4] F. Macedonio *et al.*, *Desalination*, 2007, **203**, 260.
- [5] E. Drioli *et al.*, *Chemical Engineering Research and Design*, 2006, **84**(A3), 209.
- [6] C. Fritzmann *et al.*, *Desalination*, 2007, **216**, 1.
- [7] B.V. der Bruggen, C. Vandecasteele, *Desalination*, 2002, **143**, 207.
- [8] F. Macedonio *et al.*, *Desalination and Water Treatment*, 2009, **9**, 49.
- [9] E. Drioli, F. Macedonio, Hydrophobic Membranes for Salts Recovery from Desalination Plants, 5<sup>th</sup> IWA Specialised Membrane Technology Conference for Water and Wastewater Treatment (IWA-MTC2009), September 1-3, 2009, Beijing, China.

## ABSTRACT

### **Integrated membrane systems for water desalination**

Nowadays desalination membrane-based systems, and in particular reverse osmosis, represent the most promising contribute for solving worldwide water crisis. The piece of evidence is that, every day, 31.4 million m<sup>3</sup> of desalted water are already produced by membrane processes. Membrane Engineering offers the possibility to improve the efficiency of the current membrane desalination systems, increasing water recovery factor, decreasing water desalted cost and, in particular, minimizing their environmental impact. This can be realized through the integration of different but complementary membrane processes.