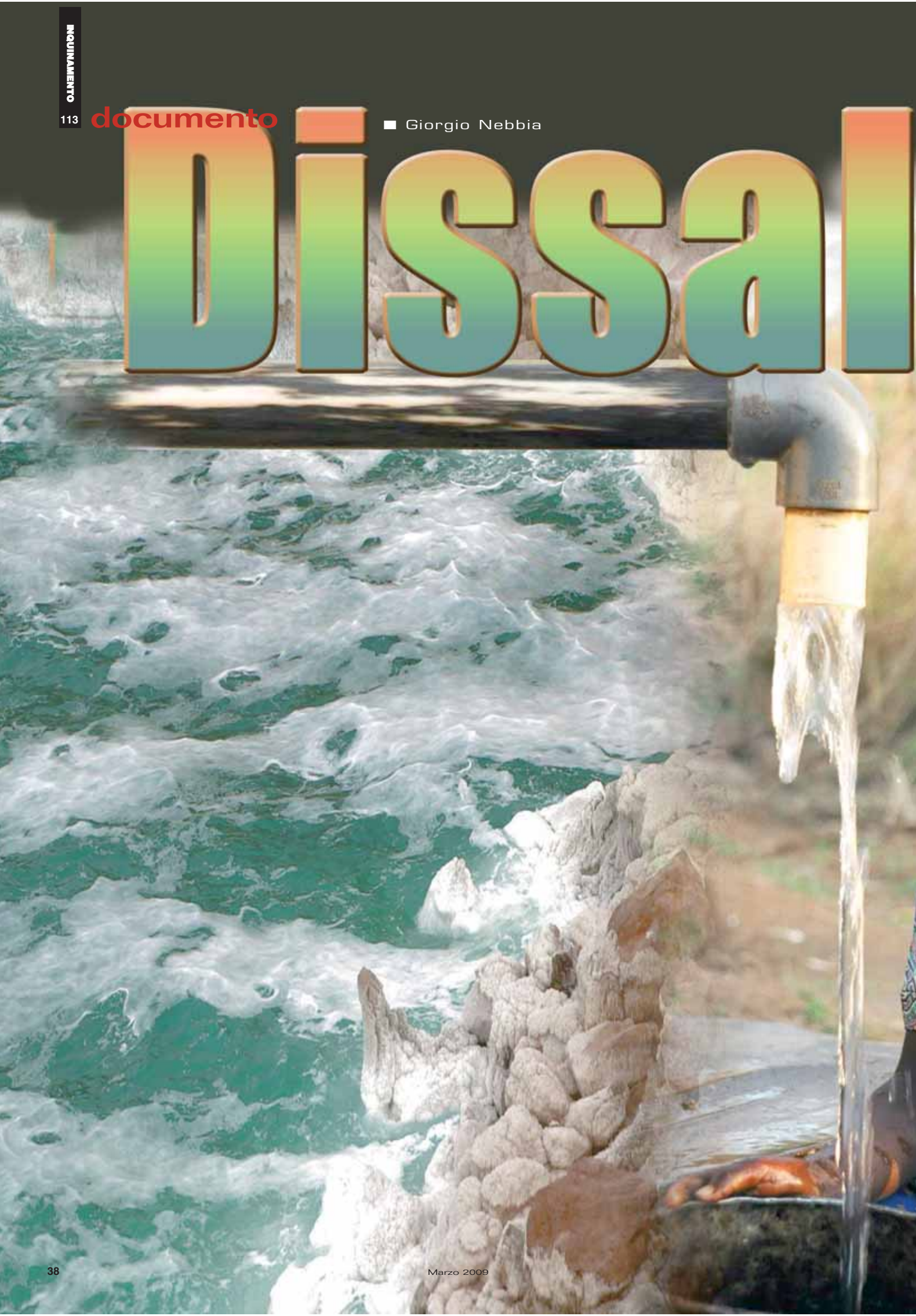


# DiSSai



documento

# azione

## Tecniche e prospettive



**"Acqua, acqua dovunque e non una goccia da bere".**

**Il vecchio marinaio della "Ballata" del poeta inglese Coleridge aveva di fronte, dopo il naufragio, una distesa di acqua imbevibile ed era tormentato dalla sete.**

**Nel corso dei secoli molti devono essersi chiesti come togliere i sali dall'acqua di mare in modo da recuperare acqua a basso contenuto salino, adatta per bere.**

**La storia è ricca di tentativi di dissalare l'acqua marina e qualche volta l'operazione è stata condotta con successo.**

**Una breve storia della dissalazione fu pubblicata anni fa in questa rivista [G. Nebbia e Gabriella Menozzi Nebbia, "Aspetti storici della dissalazione delle acque salmastre", *Acqua Industriale* (Milano), 8, (41), 13-18 e (42), 23-34 (1966)].**

Dopo la fine della Seconda Guerra mondiale la dissalazione apparve come un mezzo per far fronte alle crescenti necessità idriche dell'umanità.

Il 23 febbraio 1961 John Kennedy, allora presidente degli Stati Uniti, lanciò un messaggio per sottolineare l'importanza della dissalazione. "Nessun programma ha maggiore importanza per il futuro - non solo per noi, ma per i Paesi aridi di tutto il mondo - della ricerca di un mezzo efficiente ed economico per trasformare l'acqua degli oceani - la più grande, gratuita riserva idrica della natura - in acqua usabile dagli uomini e dalle industrie. Tale realizzazione metterebbe fine alle lotte fra vicini, fra Stati e nazioni e darebbe nuove speranze a quanti soffrono per la mancanza di acqua dolce - e di tutti i relativi vantaggi materiali ed economici - pur passando la loro vita stentata

accanto ad una enorme massa di acqua". Sotto queste sollecitazioni furono studiati e perfezionati vari sistemi di dissalazione, fra cui quelli che oggi sono applicati su larga scala.

### Acqua, sale, calore

Come è noto, l'acqua di mare contiene disciolti circa 35 grammi di sali in un litro, e di questi 29 sono costituiti da cloruro di sodio. L'acqua potabile non deve contenere, invece, più di 0,5 - 1 g/L di sali totali disciolti. Per trasformare perciò l'acqua di mare in acqua dolce occorre eliminare circa il 97-98% dei sali che contiene. La separazione di una certa quantità di acqua priva o povera di sali dall'acqua di mare (o dalle acque salmastre) richiede energia, quella necessaria per superare la forza che tiene insieme le molecole di acqua e quelle dei sali disciolti. La termodinamica mo-

stra che il minimo consumo teorico di energia per la separazione di un metro cubo di acqua priva di sali da una quantità infinita di acqua marina risulta, a 25°C, circa 2,5 megajoule. Questo potrebbe essere considerato il "costo energetico" minimo dell'acqua dissalata. Come vedremo, il consumo reale di energia è molto superiore. Il processo di distillazione, il più antico, consiste, nel fornire calore all'acqua di mare, nel farne evaporare una parte e nel far condensare il vapore, a contatto con una superficie fredda, sotto forma di acqua priva di sali. A parte i dettagli tecnici, la fonte di energia è rappresentata dal calore, anche se occorre una limitata quantità di elettricità o di energia meccanica per azionare alcune pompe e compressori. Nella condensazione il vapore acqueo restituisce il calore assorbito nell'evaporazio-



ne e lo cede al fluido raffreddante, che può essere acqua o aria. Se il calore di condensazione venisse buttato via, il consumo di calore sarebbe proibitivo, dell'ordine di  $2.500 \text{ MJ/m}^3$  di acqua distillata, mille volte il minimo consumo teorico di energia. In tutti i distillatori industriali si cerca perciò di recuperare la massima quantità possibile del calore di condensazione, per preriscaldare l'acqua di mare che sarà poi successivamente fatta evaporare. In questo modo il consumo di energia può scendere a circa  $200 \text{ MJ/m}^3$  di acqua distillata, un valore ancora elevato, rispetto al minimo consumo teorico, ma abbastanza accettabile.

### Il principio dell'evaporazione

In genere i grandi impianti di dissalazione esistenti nel mondo utilizzano come fonte di energia

il calore di rifiuto, a relativamente bassa temperatura, fra  $50$  e  $80^\circ\text{C}$ , di impianti industriali, specialmente di centrali termoelettriche. I più diffusi impianti di distillazione dell'acqua di mare su larga scala sfruttano il principio dell'evaporazione a bassa pressione, a temperature inferiori a  $100^\circ\text{C}$ . Essi sono in genere costituiti da una serie di camere, da  $4$  a  $40$  e oltre, sul cui fondo l'acqua da distillare si muove scorrendo dalla parte calda alla parte fredda del distillatore. Nella parte superiore di tali camere si trova un fascio di tubi entro cui scorre la stessa acqua marina da distillare: l'acqua di mare entra fredda e in ciascuna camera ha sempre una temperatura inferiore a quella dell'acqua che sta evaporando nella camera sottostante, per cui il vapore acqueo si condensa sulla superficie esterna dei tubi e cede il calore latente di evaporazione, assorbito durante l'evaporazione, all'acqua che si trova all'interno dei tubi. L'acqua di mare contenuta nei tubi viene così preriscaldata a mano a mano che procede dalla parte fredda alla parte calda del distillatore. L'acqua di mare preriscaldata, prima di passare nelle camere di evaporazione, viene ulteriormente scaldata col calore fornito da un impianto termico, in genere da una centrale termoelettrica. Nel corso dell'evaporazione l'acqua da distillare si raffredda, perché cede calore all'acqua che evapora, e per questo motivo nelle camere di evaporazione deve essere tenuta una pressione inferiore a quella atmosferica, tanto più bassa quanto più bassa è la temperatura a cui si verifica l'evaporazione.

Passando da una camera a quella successiva l'acqua da distillare incontra un vuoto maggiore e quindi l'evaporazione ha luogo bruscamente (flashing) per cui questi impianti prendono il nome di impianti multflash; essi consentono un notevole recupero del calore e quindi un consumo di calore abbastanza basso per unità di acqua prodotta. Uno degli inconvenienti del sistema di distillazione consiste nel fatto che alcuni sali

(soprattutto il solfato di calcio) contenuti nell'acqua di mare si insolubilizzano, durante il riscaldamento, e possono provocare incrostazioni e corrosioni. È quindi opportuno distillare l'acqua alla più bassa temperatura possibile - in genere a temperatura inferiore a  $80^\circ\text{C}$ . Peraltro quanto più bassa è la temperatura del calore fornito al distillatore, tanto maggiore deve essere il vuoto nelle camere e tanto maggiore è il consumo di energia elettrica. In genere i distillatori di acqua marina sono abbinati a centrali termoelettriche: se una parte del calore viene "estratto" dalle turbine ad una temperatura, per esempio, di circa  $80^\circ\text{C}$ , per alimentare un distillatore, una centrale termoelettrica produce meno elettricità, ma consente la produzione di una seconda "merce" importante, come l'acqua distillata. In altri distillatori, basati sulla termocompressione, la condensazione del vapore acqueo si ottiene sottoponendolo a pressione; i relativi impianti sono in genere di non grandi dimensioni, sono adatti per la dissalazione a bordo delle navi e richiedono, oltre al calore, energia elettrica per la compressione del vapore. Come ordine di grandezza un distillatore di acqua marina - del tipo multflash, prima descritto, o nelle varianti ad effetti multipli, o a termocompressione - per ogni  $\text{m}^3$  di acqua distillata comporta una richiesta di circa  $200 \text{ MJ}$  e di  $2-3 \text{ kWh}$  di elettricità.

### Sfruttare l'osmosi

Il secondo importante processo di dissalazione dell'acqua di mare e delle acque salmastre è basato sui fenomeni osmotici: immaginiamo adesso di comprimere la soluzione salina contro una membrana semipermeabile ad una pressione superiore a quella osmotica che, nel caso dell'acqua di mare, risulta di circa  $25 \text{ bar}$ . Comprimendo l'acqua di mare a  $50-70 \text{ bar}$  contro la membrana, l'acqua passa dalla soluzione salina verso lo scompartimento contenente acqua dolce; si ottiene così, per "osmosi inversa", l'estrazione di acqua dolce da



quella salina, cioè una dissalazione. Quando si è cercato, alla fine degli anni '50 nel Novecento, di applicare il principio su esposto ad un processo commerciale di dissalazione, è stato necessario cominciare a produrre delle membrane capaci di far passare l'acqua e non i sali. Negli anni '60 è stato inventato un sistema per modificare la superficie delle membrane di acetato di cellulosa in modo da attribuire a tali membrane le proprietà di filtrazione richieste nei processi di dissalazione. Sono stati così messi a punto i primi impianti di dissalazione a osmosi inversa basati su membrane piane, o su membrane avvolte a spirale; uno degli inconvenienti era rappresentato dal fatto che, durante la compressione dell'acqua di mare sulle membrane, si verifica un aumento della concentrazione

salina sulla superficie delle membrane e quindi aumenta la percentuale di sali che la membrana lasciava passare e quindi la salinità dell'acqua recuperata. Per qualche tempo il processo di dissalazione per osmosi inversa è stato applicato soltanto alle acque salmastre, cioè con un contenuto salino molto più basso di quello dell'acqua marina, ma ancora troppo elevato per l'uso potabile. La possibilità di dissalare anche l'acqua di mare con il processo di osmosi inversa è migliorata quando sono state inventate nuove membrane semipermeabili e delle membrane costituite da sottili fibre vuote all'interno, delle specie di microscopici tubi al cui interno viene posta acqua dolce e al cui esterno viene fatta circolare sotto pressione l'acqua marina o salmastra da dissalare. L'unica fonte di energia è rap-

presentata dall'energia elettrica necessaria per azionare le pompe che comprimono l'acqua di mare contro le membrane e che fanno circolare l'acqua salmastra da rigettare nel mare. Vengono oggi costruiti impianti industriali il cui consumo di elettricità si aggira intorno a una diecina di volte il consumo minimo teorico di energia richiesto dalla dissalazione dell'acqua di mare.

### Il ruolo del Sole

La scarsità di acqua è in generale maggiore nelle zone della Terra in cui è elevata l'intensità della radiazione solare e non c'è quindi da meravigliarsi che in molti abbiano pensato di usare questa fonte di energia per distillare l'acqua marina e ottenere acqua dolce, ripetendo, in uno spazio ristretto, quanto lo stesso Sole fa su enorme scala



con il ciclo naturale dell'acqua. I distillatori solari nella loro forma più antica e semplice sono anche i più efficaci quando si tratta di ottenere piccole quantità di acqua dolce in zone isolate; essi sono costituiti da vasche poco profonde, col fondo annerito, riempite con un sottile strato (circa 3-5 cm) di acqua marina. Le vasche sono coperte con una lastra di vetro, o di plastica trasparente, inclinata e sono isolate al di sotto per evitare le perdite di calore.

L'energia solare attraversa la lastra trasparente e raggiunge l'acqua di mare che si riscalda: una parte dell'acqua evapora e va a condensarsi sulla parete interna della lastra sovrastante, sotto forma di acqua dolce, priva di sali, che si recupera. L'intensità della radiazione solare alle nostre latitudini ammonta a circa 5 GJ/m<sup>2</sup>.anno. Poiché il

calore latente di evaporazione è, come si è detto, circa 2,5 MJ/L di acqua, con un distillatore solare della superficie di un m<sup>2</sup> è possibile ottenere un migliaio di litri di acqua dolce all'anno. La produzione di acqua dolce varia nei differenti mesi: in quelli estivi, quando è maggiore la richiesta di acqua dolce, può arrivare a 5 L/m<sup>2</sup> giorno. I distillatori solari hanno il vantaggio di utilizzare una frazione rilevante della radiazione solare - sia diretta, sia diffusa - che viene immediatamente trasformata in acqua dolce. Essi rappresentano, cioè, dei dispositivi che non richiedono sistemi di immagazzinamento dell'energia.

Inoltre, se si raccoglie, in una grondaia separata, l'acqua piovana che cade sulla superficie molto grande del tetto trasparente dei distillatori solari si ha la possibilità di raddoppiare, nel

corso dell'anno, la quantità di acqua dolce disponibile. Sono state proposte altre varianti della distillazione solare: alcuni hanno pensato di utilizzare l'energia solare, concentrata mediante specchi, per alimentare dei distillatori multiflash del tipo prima descritto, ma il flusso di calore è troppo irregolare e questi tentativi sono sostanzialmente falliti. Altri hanno proposto di trasformare l'energia solare in energia elettrica, mediante sistemi fotovoltaici, per alimentare impianti di osmosi inversa, ma in questo caso fa poca differenza se il dissalatore utilizza energia elettrica di origine solare o distribuita da una rete.

### Consistenza aerea

Un altro processo di dissalazione è basato sulle proprietà dell'aria di contenere, miscelata, una quantità di vapore acqueo grande ad alta temperatura e molto minore a bassa temperatura. In tale processo una corrente di aria incontra, in una torre verticale di umidificazione, un flusso di acqua marina calda che scende nella stessa torre; il contenuto di vapore acqueo dell'aria aumenta a mano a mano che aumenta la temperatura; un m<sup>3</sup> di aria a 20°C contiene al massimo 17 g di acqua mentre a 80°C ne contiene 290. L'aria calda satura e ricca di acqua, uscente dalla torre di umidificazione, viene ora a contatto con delle tubazioni in cui scorre acqua marina fredda. La temperatura dell'aria diminuisce, gran parte del vapore acqueo che essa contiene si condensa sotto forma di acqua liquida e cede il calore latente di condensazione all'acqua di mare che si preriscalda. A questo punto l'acqua di mare viene ulteriormente scaldata con una fonte di calore esterna - e qui potrebbe anche essere usato calore solare - e viene poi avviata alla torre di umidificazione.

### Elettrodialisi e congelamento

Nell'ambito dei processi basati sulla "filtrazione" dei sali attraverso membrane si può ricordare il sistema di elettrodialisi, che



ha avuto un certo successo in passato e che permette di ottenere acqua dolce da acque salmastre aventi una salinità non superiore a 3 o 4 g/L. In tali impianti l'acqua salmastra viene posta in una serie di scompartimenti, o celle, dello spessore di circa un centimetro, delimitate da una parte da una membrana che lascia passare soltanto gli ioni positivi (sodio, potassio) e dall'altra da una membrana che lascia passare soltanto gli ioni negativi (cloro, solfato). In generale le membrane sono costituite da materie plastiche opportunamente modificate. Se si fa passare della corrente elettrica attraverso le celle, in alcuni scom-

partimenti si concentrano i sali disciolti nell'acqua da dissalare e nel successivo rimane acqua povera di sali che viene recuperata; gli impianti industriali hanno decine e centinaia di celle in successione. Il processo di elettrodialisi richiede energia elettrica e il consumo di energia, in genere elevato (da 2 a 3 kWh per ogni grammo/litro di sali eliminati), dipende dalla salinità dell'acqua da trattare e dalla salinità dell'acqua "dolce" che si vuole recuperare.

Un altro sistema di dissalazione che ha attirato un certo interesse è quello basato sul congelamento di una parte dell'acqua di mare e sulla separazione del ghiaccio, che

è privo di sali, da cui è possibile recuperare per fusione acqua dolce: il processo con cui si formano gli iceberg nei mari freddi. L'energia richiesta per il congelamento è circa otto volte inferiore a quella richiesta per l'evaporazione. Infatti mentre il calore necessario per far evaporare un kg di acqua è di circa 2,5 MJ, il calore che deve essere sottratto all'acqua per dare luogo alla formazione di un kg di ghiaccio, cioè di acqua solida priva di sali, è di circa 0,3 MJ. Un processo industriale è stato messo a punto dall'ingegnere israeliano Alexander Zarchin negli anni '50 del Novecento, ma è poi stato abbandonato soprattutto perché il ghiaccio che si formava nell'acqua marina finiva per essere contaminato da acqua salina ed era difficile recuperare, dalla fusione del ghiaccio, acqua a basso contenuto salino.

### In proiezione

L'elenco dei processi di dissalazione proposti e provati sarebbe lunghissimo. L'Office of Saline Water degli Stati Uniti fra il 1952 e il 1970 ha pubblicato alcune centinaia di volumi (la collezione completa si trova nel "Fondo Giorgio e Gabriella Nebbia" donato alla Fondazione Micheletti di Brescia [www.musil.bs.it](http://www.musil.bs.it)) contenenti i risultati delle ricerche finanziate dal governo americano; fra tale imponente massa di lavori è possibile trovare numerose idee che meriterebbero di essere riprese. Si potrebbe forse sviluppare qualche nuovo processo di dissalazione, di interesse pratico, se, per esempio, si capisse come le cellule di molte piante e di molti animali riescono a "filtrare" acqua dolce dall'acqua salmastra o marina circostante, se si riuscisse a riprodurre molti fenomeni naturali che portano alla separazione di acqua dolce. Oggi nel mondo sono in funzione 13.000 impianti di dissalazione con una produzione di acqua dolce di circa 20 miliardi di metri cubi all'anno, oltre il doppio della quantità di acqua potabile usata dalle famiglie in tutta Italia in un anno. In molti Paesi i distillatori rappresentano la principale fonte di acqua dolce, con produzioni unitarie di decine di migliaia di metri cubi di acqua dolce al giorno. In Italia dissalatori di acqua marina sono installati a Taranto, Gela, Civitavecchia e in varie centrali termoelettriche. Molti riferimenti e informazioni si trovano nella sempre utile enciclopedia telematica Wikipedia e nel sito [www.desline.com](http://www.desline.com) della European Desalination Society che, fra l'altro, ha annunciato un importante congresso sui rapporti fra dissalazione, energia e ambiente per il 17-20 maggio 2009 a Baden-Baden, in Germania.

