

# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Agronomia animali alimenti risorse naturali e ambiente –  
DAFNAE**

**Corso di laurea triennale in Scienze e Tecnologie Agrarie**

**ACQUA DESALINIZZATA PER FINALITÀ IRRIGUE:  
VANTAGGI E SVANTAGGI**

**Relatore:  
Prof. Carmelo Maucieri**

**Laureando: Vignaga Giacomo  
Matricola: 2007838**

**Anno accademico: 2022-20223**

## INDICE

<b>Riassunto</b> .....	2
<b>1 Introduzione</b> .....	3
<b>1.1 Cambiamento climatico</b> .....	4
<b>1.2 Desalinizzazione</b> .....	5
<b>1.2.1 Distillazione multi-effetto (Multi-Effect Distillation, MED)</b> .....	6
<b>1.2.2 Distillazione multi-stadio (Multi-Stage Flash Distillation, MSF)</b> .....	7
<b>1.2.3 Distillazione con compressione di vapore (Vapour Compression Distillation, VCD)</b> 8	
<b>1.2.4 Osmosi inversa</b> .....	9
<b>1.2.5 Nanofiltrazione</b> .....	10
<b>1.2.6 Elettrodialisi</b> .....	11
<b>1.2.7 Resine a scambio ionico</b> .....	11
<b>1.3 Uso a livello mondiale</b> .....	12
<b>2 Vantaggi della desalinizzazione</b> .....	13
<b>2.1 Superfici e fonti di approvvigionamento idrico per l'agricoltura.</b> .....	14
<b>2.2 Fonti di energia rinnovabile</b> .....	14
<b>2.3 Rigenerare il ciclo dell'acqua</b> .....	15
<b>3 Svantaggi della desalinizzazione</b> .....	16
<b>3.1 Problemi agronomici</b> .....	16
<b>3.1.1 Mancanza di elementi nutrienti</b> .....	16
<b>3.1.2 Fitotossicità del Boro</b> .....	17
<b>3.1.3 Tossicità del Cl e del Na</b> .....	18
<b>3.1.4 Salinità dei terreni</b> .....	19
<b>3.2 Costi e consumi energetici</b> .....	20
<b>3.3 Impatto ambientale</b> .....	21
<b>4 Conclusione</b> .....	22
<b>Bibliografia</b> .....	23

### **Riassunto**

A livello globale, la crescita della popolazione sta direttamente e indirettamente aumentando la richiesta idrica, andando a diminuire la disponibilità per il settore agricolo. Inoltre, il cambiamento climatico sta creando gravi problemi alle risorse idriche andando ad aumentare la scarsità d'acqua in molte regioni del mondo. L'acqua desalinizzata svolge un ruolo chiave nel ridurre il divario tra richiesta idrica e risorsa disponibile. Ad oggi sono presenti numerosi impianti di desalinizzazione, diffusi in molte regioni aride o semi aride, del mondo che producono un grande volume di acqua potabile per l'uso agricolo. La rimozione dei sali presenti nell'acqua marina avviene attraverso processi molto diversi tra loro. La tecnologia più usata è l'osmosi inversa ma troviamo anche la distillazione multi-stadio, la distillazione multi-effetto, l'elettrodialisi ed altre. L'acqua desalinizzata presenta molti vantaggi, tra cui il più importante è la possibilità di attingere ad una fonte idrica di volume molto più elevato di quello delle fonti idriche di acqua dolce. Sono però presenti molti punti sfavorevoli che ne limitano la diffusione. Tra gli svantaggi troviamo molti problemi di livello agronomico come la mancanza di alcuni elementi nutritivi o l'eccessiva presenza di altri nell'acqua desalinizzata, con problemi di fitotossicità; oppure il consumo di energia elettrica richiesta durante il processo di desalinizzazione e molto spesso prodotta da fonti fossili.

## 1 Introduzione

Sulla terra sono presenti grandi quantità di acqua, che per il 97,5 % è acqua salata contenuta nei mari e per solo il 2,5% è acqua dolce. Di questa ultima frazione, l'80% è sotto forma di ghiaccio nelle calotte polari, lasciando soltanto il 20 % disponibile nei fiumi, nelle falde acquifere e nei laghi [1]. La produzione alimentare, data dall'agricoltura irrigua, guida la domanda di acqua a livello globale, con in media il 70% di tutta l'acqua prelevata e raggiungendo cifre sopra l'85% nelle regioni aride o semiaride, altamente specializzate. Con l'aumento, a livello globale, della domanda di cibo da parte della popolazione in crescita ed con le prospettive di riduzione delle risorse idriche disponibili, date dal cambiamento climatico, la scarsità idrica si sta espandendo ed intensificando in tutto il mondo [2]. In molte zone del mondo, dove la domanda di acqua dolce supera la fornitura disponibile, le comunità si sono rivolte a fonti idriche alternative, al riciclo dell'acqua, alle importazioni ed alla desalinizzazione dell'acqua di mare o di acque salmastre, sia per il consumo umano sia per scopi agricoli. La desalinizzazione è il processo che punta alla rimozione dei sali in eccesso e di altre sostanze chimiche presenti nell'acqua di mare o nelle acque salmastre, attraverso l'osmosi inversa, la filtrazione, l'evaporazione e altri processi [1]. Le nuove tecnologie, e i nuovi materiali che vengono usati, hanno consentito all'acqua desalinizzata di diventare più competitiva e accessibile, in termini di costi, a molti utenti.

Le prime fonti storiche di processi di desalinizzazione dell'acqua di mare risalgono al 320 a.C. quando Alessandro di Arodisia racconta come dei marinai che facevano bollire l'acqua di mare per raccoglierne il vapore con delle spugne [1], mentre più recentemente fu introdotta, alla fine del XVIII secolo, sulle navi della flotta inglese per aumentare le forniture di acqua potabile a bordo; in questo caso erano avvantaggiati dai sistemi di propulsione delle navi stesse che erano alimentati a vapore. La prima unità di desalinizzazione fu realizzata in Scozia, a Glasgow, nel 1885, seguita nel 1907 da una unità installata nel golfo Persico che verrà sostituito, nel 1928, da due impianti con una capacità di 135 m<sup>3</sup>/giorno [3]. Questi impianti sfruttavano la tecnologia dell'evaporazione dell'acqua di mare seguita poi dalla condensazione del vapore prodotto; queste tecnologie, ad oggi, sono stata quasi tutte sostituite da sistemi ad osmosi inversa, che presenta un costo energetico inferiore. Il sistema di osmosi inversa si basa sulla permeabilità di particolari membrane che, applicando pressione sulla soluzione concentrata, ne permette il passaggio contro il normale flusso osmotico verso una soluzione meno concentrata. Questo fenomeno fu osservato per la prima volta nel 1748 dal religioso e fisico Jean Antoine Nollet, ma rimase inutilizzato per circa due secoli fino al 1959 quando, presso l'università della California e l'università della Florida, fu realizzata la prima membrana e successivamente, nel 1965, il primo impianto sperimentale. Successivamente fu brevettato un sistema di membrane asimmetrico con porosità diversa passando da una faccia all'altra della membrana, permettendo un passaggio favorito all'acqua; questo sistema, unito ad una maggior durata delle nuove membrane, ha permesso di avere costi di produzione più contenuti permettendo una rapida crescita del settore [2]. Nel 2013 si contavano oltre 17.000 impianti attivi in 150 paesi diversi con una produzione di  $80 \times 10^6$  m<sup>3</sup> /giorno di acqua che è stata aumentata a  $97,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> /giorno nel 2015. L'Arabia Saudita e Qatar sono ad oggi i maggiori produttori a livello mondiale di acqua desalinizzata arrivando a coprire rispettivamente il 60% e il 100% della domanda [1] ma troviamo molti impianti situati anche in Spagna, Israele, Stati Uniti, Australia, Cina e Italia [2].

Il presente lavoro di tesi si focalizza sullo studio dell'acqua desalinizzata per finalità agricole, andando ad analizzare i vantaggi e gli svantaggi dell'uso di questa fonte. L'elaborato viene così

suddiviso: una prima parte dove vengono analizzate le problematiche legate al cambiamento climatico; il processo di desalinizzazione tipo e le principali tecnologie di desalinizzazione presenti, in particolare processi di filtrazione (come l'osmosi inversa, la nanofiltrazione, elettrodialisi), l'evaporazione e condensazione, le resine a scambio ionico; e la diffusione dell'acqua desalinizzata a livello mondiale. Nella seconda parte vengono analizzati i punti di forza dell'acqua desalinizzata (vantaggi) e successivamente le criticità che ne limitano la diffusione (svantaggi) soffermandosi sulle problematiche agronomiche come la mancanza di elementi nutritivi, la tossicità di alcuni elementi presenti nell'acqua (boro, cloro e sodio) e aumento della salinità dei terreni; si analizzeranno problematiche a livello energetico come il consumo e la provenienza dell'energia usata, e problematiche a livello ambientale come smaltimento dei sottoprodotti (salamoia), l'impatto visivo, impatto sugli ecosistemi marini e la produzione di inquinanti come gas serra.

### **1.1 Cambiamento climatico**

Nel corso dell'ultimo secolo, i livelli di inquinamento sono aumentati notevolmente e, con le continue emissioni di gas serra, potrebbero provocare un ulteriore surriscaldamento di 2-6 °C entro la fine del secolo, portando a cambiamenti climatici estremi che si ripercuotono non solo sulla salute umana, ma anche sull'idrologia e sulle risorse agricole. Inoltre, a causa della continua crescita della popolazione mondiale, si va incontro ad un aumento della domanda idrica globale e una riduzione dei terreni facilmente coltivabili [4]. Con l'aumento della temperatura si prevede che le aree adatte all'agricoltura si spostino verso nord con un ritmo di circa 50 km ogni aumento di 1°C di temperatura. Questo provocherà un aumento della concorrenza per la terra coltivabile poiché alcune aree geografiche diventeranno troppo aride per la coltivazione oppure saranno sommerse. Si prevede infatti che il livello del mare si alzi di 18-59 cm, a causa del surriscaldamento globale, andando a sommergere, entro la fine del secolo territori oggi coltivati [6].

La carenza idrica, ad oggi, è un grave problema che colpisce da 1,6 (25% della popolazione mondiale) a 2,4 (39%) miliardi di persone concentrate soprattutto in Asia orientale e meridionale ma troviamo anche parte degli Stati Uniti e dell'Australia. Entro il 2050 si stima che la popolazione globale totale supererà i 9 miliardi, andando a creare enormi pressioni sulle risorse idriche portando ad avere da 3,1 (37% della futura popolazione mondiale) a 4,3 (53%) miliardi di persone in condizioni di scarsità idrica. Nel futuro prossimo, sul globo avremo regioni che sperimentano una diminuzione della scarsità idrica e un aumento delle piogge che provocano alluvioni e/o inondazioni, mentre dalla controparte regioni, molto più estese rispetto alle prime, che sperimenteranno un aumento della scarsità idrica. In regioni come l'Europa mediterranea, nord Africa, Arabia, centro degli Stati Uniti e Australia meridionale si osserva un aumento della scarsità idrica con una riduzione del volume di precipitazioni, in misura più marcata nel bacino del mediterraneo. Nelle zone come l'Asia centrale (India, Afghanistan, Nepal, Turkmenistan, Kazakistan), l'Asia orientale (Cina, Mongolia, Russia) e corno d'Africa si osserverà una riduzione della scarsità idrica con l'aumento delle precipitazioni portando ad alluvioni o inondazioni [5]. L'agricoltura, a livello globale, usa ad oggi circa 7.130 km<sup>3</sup> di acqua all'anno, di cui 5560 km<sup>3</sup> sono acqua "verde" disponibile grazie alle precipitazioni, e 1.570 km<sup>3</sup> sono acqua "blu" prelevata da altre fonti. Uno studio suggerisce che entro il 2050 l'uso potrebbe aumentare fino a 8.515 km<sup>3</sup> con un incremento di circa 1.385 km<sup>3</sup> all'anno, ma che le riserve idriche non bastino a soddisfare la domanda [6].

Gli effetti del cambiamento climatico si riscontrano anche nei numerosi incendi boschivi che hanno colpito molte aree del globo; solo in Europa nel 2019 più di 400.000 ettari sono andati

bruciati tra Spagna, Portogallo, Romania e Polonia. Tra il 2019 e il 2020 in Australia (considerato il continente più arido sulla terra) si sono verificati incendi boschivi tra i più importanti mai registrati fino ad ora; inoltre sempre in Australia si sono registrate temperature superiori anche di 10 gradi rispetto alla media stagionale. Nello stesso periodo anche la foresta Amazzonica è stata gravemente danneggiata da incendi, a causa dell'elevata deforestazione che è in atto. Tutto ciò va a sua volta ad aumentare i livelli di inquinamento andando ad accentuare la probabilità di questi fenomeni [7].

In Italia, gli effetti del cambiamento climatico si registrano in molti eventi, a partire dagli incendi, che hanno colpito soprattutto il meridione, e dall'emergenza idrica, che ha generato una grave siccità, che ha colpito tutta la penisola, nel corso del 2022. Queste situazioni sono generate principalmente da temperature molto elevate, che vanno ad aumentare l'evapotraspirazione dei terreni, e dalla carenza di precipitazioni per lunghi periodi [7, 8]. Anche il fiume Po ha subito i danni del cambiamento climatico: nel corso dell'ultimo periodo raggiungendo il minimo livello di portata degli ultimi 70 anni con una risalita del cuneo salino anche a più di 30 km dalla foce. La mancanza di piogge e il continuo prelievo di acqua per l'irrigazione delle colture stanno facendo diminuire in maniera drastica la portata del fiume. La risalita del cuneo salino provoca molte problematiche come la contaminazione delle falde sotterranee, mettendo in pericolo la vita di flora e fauna limitrofe al fiume, e aumentando il contenuto di sodio nei terreni limitrofi e favorendo la desertificazione [7].

## 1.2 Desalinizzazione

Gli impianti di desalinizzazione offrono una soluzione al problema della scarsità idrica; ad oggi sono delle fonti idriche molto importanti, se non l'unica, per molte aree aride o semi-aride oppure zone con forniture idriche molto limitanti, come ad esempio in Spagna, Asia, Arabia Saudita, Australia, Stati Uniti. Oltre a queste aree vengono usati anche in molte isole come unica fonte idrica sia per la fornitura di acqua potabile sia per l'agricoltura.

Con il processo di desalinizzazione (o dissalazione) si punta a rimuovere o ridurre fino a valori accettabili i sali e le altre sostanze chimiche presenti all'interno dell'acqua di mare oppure nelle acque salmastre, in modo da poter utilizzare queste fonti idriche inutilizzate per soddisfare la domanda idrica. L'acqua di mare contiene sali ed altri componenti presenti in soluzione oppure in sospensione, in quantità variabile a seconda dei luoghi da cui viene prelevata l'acqua e dalla stagione. Tra i sali presenti troviamo il cloruro di sodio, bicarbonato di calcio, solfato di magnesio ed altri. L'acqua che viene prodotta per desalinizzazione non deve essere totalmente priva di questi sali perché, nel caso dell'acqua potabile, avremo un'acqua di scarsa potabilità e insapore, mentre nel caso di acqua per l'irrigazione avremo la totale mancanza di sali che sono necessari per la vita delle colture irrigate [9].

La dissalazione dell'acqua di mare ha un costo di circa 3 volte superiore rispetto all'uso di acque salmastre; queste però sono molto spesso associate alle acque sotterranee, che sono una risorsa finita a differenza di quella marina, perciò bisogna valutare attentamente l'uso di acque salmastre. Nel caso di acqua di mare con salinità pari a 35000 mg L<sup>-1</sup> la pressione osmotica è pari a 2800 kPa, mentre nel caso di acque salmastre con salinità pari a 1600 mg L<sup>-1</sup> abbiamo una pressione osmotica pari a 140 kPa [10].

Gli impianti di desalinizzazione possono essere molto diversi sulla base della tecnologia che usano, ma in linea generale troviamo:

- presa dell'acqua composta da pompe e tubature che prelevano l'acqua dalla sorgente (marina o salmastra) e la portano all'impianto;

- processo di pretrattamento in cui si ha la filtrazione dell'acqua grezza per eliminare componenti solide. In alcuni casi si ha anche l'aggiunta di prodotti chimici per far precipitare la maggior parte dei sali in modo da ridurre la corrosione degli impianti;
- processo di desalinizzazione vero e proprio dove dall'acqua in entrata vengono eliminati i Sali in soluzione o sospensione;
- processo di post trattamento che consiste in una serie di operazioni per correggere il pH oppure, come nel caso di acqua per l'irrigazione, l'aggiunta di sali richiesti dagli utilizzatori finali [3].

Il permeato derivante dai processi di osmosi inversa di norma contiene concentrazioni di soluti inferiori a 250 mg L<sup>-1</sup> un pH, un potere tampone e una durezza molto bassi. In tali condizioni non può essere utilizzato per nessuna applicazione né domestica, né industriale e né tantomeno agricola; perciò, il post trattamento del permeato è fondamentale per poter utilizzare l'acqua prodotta. Questo fa sì che la composizione chimica, dell'acqua che viene prodotta tramite desalinizzazione, sia molto diversa sulla base della tecnologia usata, del tipo e dell'intensità dei post trattamenti che vengono eseguiti. Nonostante tutto non esiste una regolamentazione comune per i parametri dell'acqua desalinizzata perciò l'acqua prodotta deve essere solo conforme ai criteri nazionali dei vari stati. Solo Israele ha adottato, per la qualità dell'acqua desalinizzata sia per uso agricolo sia per uso umano, una serie di norme che comprendono dieci parametri quali pH, conducibilità elettrica, concentrazione di alcuni ioni (Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), concentrazione del boro, alcalinità e precipitazione del carbonato di calcio [2].

Vi sono numerose tecnologie disponibili, alcune delle quali sono consolidate e largamente sviluppate mentre altre sono usate solo in piccoli impianti dimostrativi o per ricerca. Gli impianti di desalinizzazione vengono suddivisi in due grandi gruppi sulla base della tecnologia che viene usata per separare i sali dall'acqua in entrata: processi termici e processi a membrana. I processi termici o sistemi evaporativi sono i primi sistemi di desalinizzazione ad essere usati per la produzione di acqua potabile. L'idea di base è di sfruttare l'energia termica per generare vapore dall'acqua di mare e poi condensarlo; l'energia che viene utilizzata può essere prodotta utilizzando il calore generato da un processo termico come la combustione di carburante, attraverso energia elettrica oppure attraverso un processo meccanico. Tra i sistemi di evaporazione e condensazione troviamo la distillazione multi-effetto (MED), la distillazione multi-stadio (MSF) e la compressione del vapore (VC).

Nei processi a membrana tutti i sistemi si basano sul principio di semipermeabilità di una membrana, che permette il passaggio oppure trattiene differenti tipi di molecole sulla base della loro natura o della forma. Unica eccezione sono i sistemi basati su resine a scambio di cationi dove, materiali naturali o artificiali attraggono su di essi gli ioni disciolti nella soluzione. Tra i processi a membrana troviamo l'elettrodialisi, resine a scambio cationico (usate per produrre acqua con bassissime concentrazioni di sali), l'osmosi inversa e la nanofiltrazione.

Esiste anche una terza categoria di sistemi che estraggono acqua dolce a partire dall'acqua di mare usando il ghiaccio come prodotto intermedio. Si utilizza un gas che viene compresso ed inviato a miscelarsi con l'acqua salata; nel momento in cui il gas si espande assorbe energia dall'esterno creando dei cristalli di ghiaccio, che vengono recuperati e fatti sciogliere così da ottenere acqua dolce. Questo tipo di sistemi non sono sviluppati a livello commerciale, ma sono usati per studi [9].

### **1.2.1 Distillazione multi-effetto (Multi-Effect Distillation, MED)**

I sistemi di desalinizzazione distillazione multi-effetto sono poco diffusi a causa di problemi legati al dimensionamento ed alla corrosione dei tubi; vengono ancora usati per estrarre succo di canna da zucchero oppure per produrre sale. Sono divisi in sistemi ad alta temperatura, che lavorano con temperature sopra i 90°C, oppure sistemi a bassa temperatura che lavora con temperature sotto i 90°C; l'uso di temperature sotto i 90°C vengono usate per prevenire incrostazioni e corrosioni al sistema. Questi sistemi hanno una serie di camere in numero variabile da 4 fino a 21 che si susseguono l'una all'altra. Nella prima camera l'acqua preriscaldata viene spazzata all'interno della camera dove è presente uno scambiatore di calore, alimentato da vapore generato da un altro impianto, che grazie alla depressione presente all'interno fa evaporare l'acqua marina. Il vapore viene raccolto sulla parte alta della camera, mentre la salamoia viene recuperata sul fondo. Il vapore attraverso dei tubi passa nella seconda camera dove, grazie alla depressione maggiore rispetto a prima, viene usato per riscaldare altra acqua marina; il processo continua così fino all'ultima camera dove tutto il vapore prodotto viene condensato, grazie ad uno scambiatore di calore alimentato dall'acqua marina in entrata, così da ottenere acqua dolce. In genere la salamoia prodotta dalla prima camera viene inserita in quella successiva in modo da forzare l'estrazione di acqua dolce. L'energia richiesta da questo tipo di sistema viene usata principalmente per scaldare il vapore utilizzato come fonte di calore nella prima camera, e dal sistema di pompe che crea e mantiene costante la depressione nelle varie camere. Questo tipo di sistema hanno capacità di produzione tra i 2.000 e i 25.000 m<sup>3</sup>/giorno negli impianti di grandi dimensioni e sono concentrati in medi oriente e Cina [3,9].

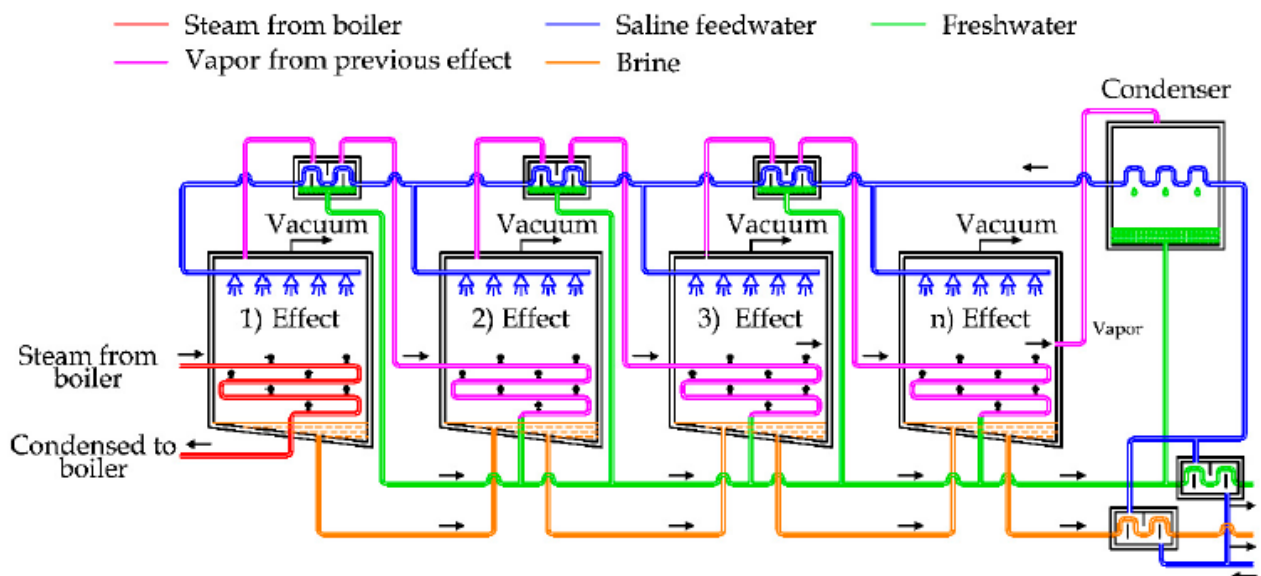


Figure 1. Schema di un desalinizzatore di tipo a distillazione multi-effetto (MED) [2]

### 1.2.2 Distillazione multi-stadio (Multi-Stage Flash Distillation, MSF)

In questo sistema di desalinizzazione le fasi di evaporazione e condensazione sono poste una di seguito all'altra in modo che il calore latente di evaporazione possa essere utilizzato per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso. All'interno del riscaldatore della salamoia (*brine heater*) l'acqua in entrata viene scaldata alla sua massima temperatura (che varia in base alla pressione d'esercizio), senza che si formi vapore. Per raggiungere questa temperatura, detta *top brine temperature*, si usa il calore rilasciato dalla condensazione di vapore da un altro impianto oppure da una fonte di calore (combustibile, elettricità). L'acqua calda viene fatta passare, attraverso un orifizio, in un secondo stadio dove vi è minor pressione facendo vaporizzare una



parte dell'acqua (*flash*). Con questo *flash* la maggior parte dei sali disciolti precipita nella salamoia che, a causa della vaporizzazione di una parte dell'acqua, si è raffreddata andando in equilibrio con il nuovo ambiente. Il vapore viene raccolto nella parte alta di ciascuno stadio e viene condensato sui tubi degli scambiatori fin ad uscire come acqua dolce separatamente dal resto della salamoia che non è vaporizzata nei vari stadi. Questo processo viene ripetuto negli stadi successivi, fino anche a 40 volte, con pressioni via via decrescenti in modo massimizzare l'energia usata e la conversione dell'acqua. La depressione presente in ogni stadio viene mantenuta costante attraverso un eiettore che sfrutta l'effetto venturi generato dal vapore in uscita per creare una depressione nei vari stadi oppure da una pompa per il vuoto. Questo tipo di impianto di desalinizzazione ha un'efficienza di funzionamento dipendente dal numero di stadi presenti, che in genere varia da 15 a 25, e può soddisfare una richiesta da 4.000 a 57.000 m<sup>3</sup>/giorno usando una temperatura di riscaldamento di 90°C – 110°C. Questa tipologia di desalinizzatori sono usati normalmente sulle navi ma anche in molte parti del mondo soprattutto lungo la costa come negli Stati Uniti, in medio oriente e Korea per produrre acqua potabile [3,9].

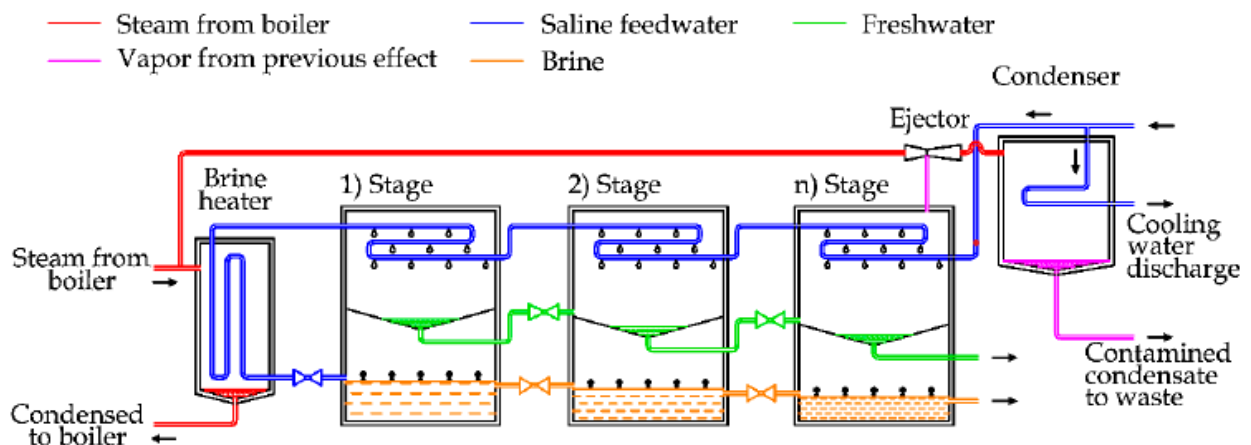


Figure 2. Schema di un desalinizzatore di tipo a distillazione multi-stadio (MSF) [2]

### 1.2.3 Distillazione con compressione di vapore (Vapour Compression Distillation, VCD)

Il sistema a compressione di vapore si basa sulla transizione di fase liquido-vapore. Un compressore recupera il vapore all'interno della camera che viene compresso andando ad aumentare la sua temperatura e la pressione. Il vapore pressurizzato viene usato, attraverso uno scambiatore di calore, per trasferire calore alla soluzione salina in entrata, che viene spazzata dall'alto sopra lo scambiatore, per produrre altro vapore. Il vapore poi viene fatto passare attraverso uno scambiatore di recupero di calore dove viene condensato e l'acqua salina in entrata viene preriscaldata. La soluzione salina all'interno della camera è formata da una parte di acqua marina, e da una parte di salamoia che viene presa dal fondo della camera, e rappresenta la parte che non è evaporata durante il processo precedente.

Questo tipo di desalinizzatore produce un volume di acqua dolce tra i 100 e i 3.000 m<sup>3</sup>/giorno [3].

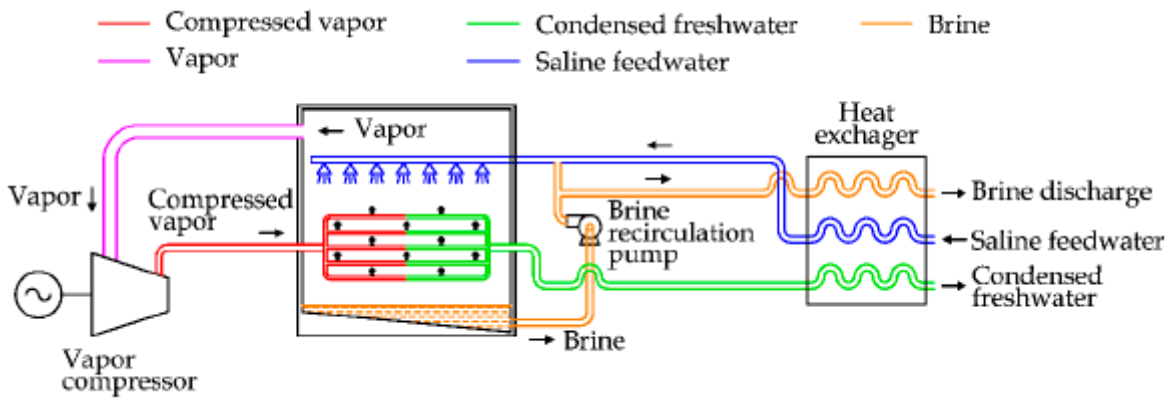


Figure 3 Schema di un desalinizzatore di tipo a distillazione con compressione di vapore (VCD) [2]

### 1.2.4 Osmosi inversa

L'osmosi inversa è una tecnologia basata sull'uso di una membrana semipermeabile che presenta specificità al passaggio di alcune molecole. In natura quando due soluzioni con concentrazione diversa sono separate da una membrana semipermeabile, la soluzione meno concentrata oltrepassa la membrana per andare a diluire la soluzione più concentrata. Questo fenomeno, già osservato nel 1748 da Jean Antoine Nollet [2], accade perché a livello della membrana si crea una pressione che è proporzionale alla concentrazione che spinge la soluzione meno concentrata verso quella più concentrata, fino al raggiungimento dell'equilibrio da parte del sistema. Andando ad applicare una pressione pari a quella osmotica sulla soluzione più concentrata si va a bloccare il flusso osmotico mentre aumentando ancora la pressione il flusso si inverte, facendo così scorrere la soluzione da quella più concentrata verso quella meno concentrata, ottenendo il processo di osmosi inversa. L'energia da fornire corrisponde alla pressione per generare l'osmosi inversa che per l'acqua di mare corrisponde ad una pressione tra i 26 e 30 bar ma causa delle dissipazioni presenti nel sistema, soprattutto a livello della membrana, si lavora con pressione tra i 65 e 70 bar. Un impianto di osmosi inversa è generalmente formato da 5 parti principali: pretrattamento, pompa ad alta pressione, membrana, recuperatore di energia e post trattamento [9]. Durante il pretrattamento si eliminano particelle solide sospese nell'acqua attraverso microfiltrazioni, si elimina la componente biologica con raggi UV, rimozione di eventuali oli presenti ed eliminazione del cloro che andrebbero a danneggiare la membrana e infine la correzione del pH. Dopo il pretrattamento l'acqua di mare viene pressurizzata da una pompa ad alta pressione così da passare attraverso la membrana; non tutta l'acqua passa attraverso la membrana ottenendo valori del 35%-50%; praticamente solo metà o meno dell'acqua in entrata genera acqua dolce mentre la restante parte viene espulsa come salamoia. Per ridurre i costi operativi vengono montati dei sistemi di recupero dell'energia presente all'interno della salamoia che viene espulsa, come l'uso di turbine Pelton, che generano elettricità per alimentare il motore, o l'uso di un turbocompressore che aiutano a generare la pressione richiesta dall'impianto. In alcuni casi possiamo trovare entrambi i sistemi [3]. Recentemente si usa uno scambiatore di pressione rotativo che permette di recuperare l'energia contenuta nella salamoia, con un'efficienza pari al 98%. Il fluido in pressione (la salamoia da espellere) entra in una matrice ceramica ricca di piccoli canali, e si interfaccia all'acqua salina, cedendo la sua energia e portando la pressione dell'acqua di alimento circa uguale a quella espulsa dalla membrana. Grazie alla velocità di rotazione non avviene mescolamento tra i due fluidi [3].

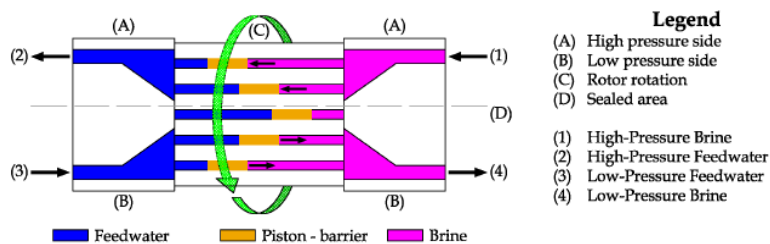


Figure 4 Principio di funzionamento di uno scambiatore di pressione [2]

Dato che la portata del fluido è bassa vengono usate pompe centrifughe monostadio oppure volumetriche a pistoni assiali che garantiscono un rifornimento costante. Il componente più importante del sistema è la membrana semipermeabile che permette la desalinizzazione. Queste devono essere molto sottili, in modo da essere permeabili all'acqua e trattenere i sali, infatti spessore e flusso hanno un rapporto inversamente proporzionale [3]. Le membrane più usate sono di poliammide formata da tre strati: un supporto strutturale a base di nastro di poliestere (spessore 120-150  $\mu\text{m}$ ), uno strato microporoso (circa 40  $\mu\text{m}$ ) e lo strato filtrante (0,2  $\mu\text{m}$ ). Il nastro di poliestere non fornisce un supporto ottimale allo strato filtrante perciò si aggiunge un intermedio microporoso di polimero polisolfonico. Lo strato filtrante è costituito da poliammide aromatica, ottenute tramite polimerizzazione della 1,3-fenilendiammina e del cloruro triacido del benzene [11], oppure nei primi impianti è formato da acetato di cellulosa. Per avere una filtrazione ottimale sono necessarie superfici estese per cui si usano diverse tecnologie tra cui la spirale avvolta e la fibra cava per ridurre il volume totale. Nel caso della fibra cava l'acqua salata viene pompata al centro di queste membrane, il permeato esce attraverso le pareti mentre la salamoia esce dall'estremità opposta della fibra; vengono assemblate assieme più fibre per formare un unico elemento. Nel caso delle membrane avvolte a spirale troviamo due strati filtranti e un distanziatore posti attorno a un tubo centrale; l'acqua salina entra nell'elemento mentre il permeato passa attraverso la membrana e scorre all'interno nel distanziatore fino al tubo centrale per poi venir allontanato.

Le membrane sono soggette a deterioramento, alla sovrassaturazione a causa di composti inorganici (detto *scaling*) e a sporcarsi a causa delle particelle trasportate dall'acqua oppure alla crescita biologica sulle membrane. L'acqua che permea possiede caratteristiche che non la rendono adatta né al consumo umano, né all'irrigazione perciò si effettua un post trattamento dove si va ad eliminare il boro, attraverso resine selettive, e a remineralizzare l'acqua con l'aggiunta di Mg e Ca ed altri elementi [9].

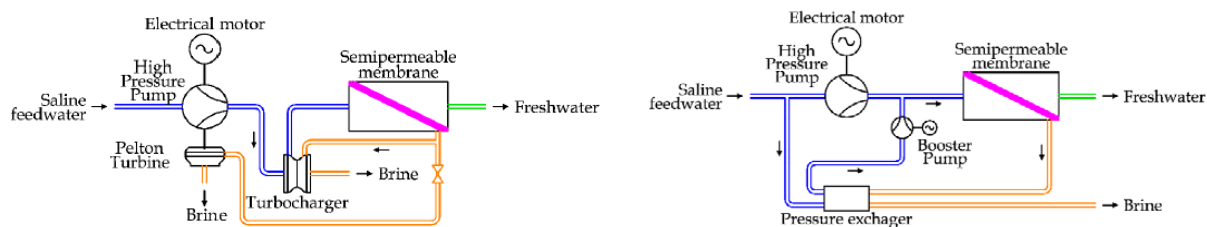


Figure 5 Schema di un desalinizzatore a osmosi inversa con turbina Pelton e turbocompressore, a sinistra, e con scambiatore di pressione, a destra. [2]

### 1.2.5 Nanofiltrazione

La nanofiltrazione fa parte dei processi di filtrazione a membrana ed è usata sia per la produzione di acqua potabile, sia per applicazioni farmaceutiche oppure alimentari. Il funzionamento di questo sistema è molto simile all'osmosi inversa, eccezione fatta per l'uso di meno pressione. In molti casi i due processi sono usati in sequenza [3]. Le membrane che

vengono utilizzate sono a base di poliammide posta in strutture composite a formare un film sottile, molto simile alle membrane usate nell'osmosi inversa. La filtrazione avviene grazie a dei microfori presenti sulla membrana con un diametro tra 0,5 e 1,5 nm [10]. Questa tecnologia rimuove la maggior parte degli ioni bivalenti, come  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , con un'efficienza tra il 90% e il 98%, mentre la rimozione di ioni monovalenti è limitata ad un 60%-85%. La pressione d'esercizio si aggira tra i 34 e 48 bar [3].

### 1.2.6 Elettrodialisi

L'elettrodialisi è un processo di separazione elettrochimico a membrana dove gli ioni sono separati tramite membrane a scambio ionico, grazie a un gradiente di potenziale. I sali disciolti nell'acqua salina sono separati attraverso l'uso di elettrodi, che generano un campo elettrico in corrente continua, e membrane a ioni selettive disposte in celle. Attraverso gli elettrodi si applica un gradiente di potenziale in modo che le specie cationiche si avvicinano al catodo passando attraverso le membrane di scambio che consentono il solo passaggio dei cationi respingendo gli anioni; allo stesso modo le specie anioniche vengono attratte dall'anodo oltrepassando la membrana di scambio che li separa dall'acqua dolce. Così facendo si ottengono due soluzioni concentrate ricche di anioni e di cationi e l'acqua dolce. Questa tecnologia permette di invertire la polarità con cadenza periodica in modo da ridurre la formazione di incrostazioni sulle membrane che vengono portate via dalla salamoia.

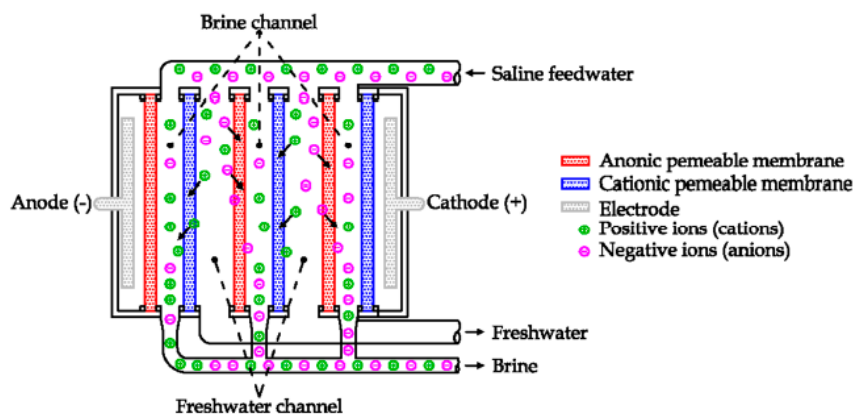


Figure 6 Schema di un desalinizzatore ad elettrodialisi [2]

### 1.2.7 Resine a scambio ionico

Con il termine di resine a scambio ionico non si intende un processo unico, ma ci si riferisce ad un gruppo di composti organici che sono stati trattati chimicamente per assorbire gli ioni presenti nella soluzione e liberare altri ioni nella soluzione. Nel passato al posto di usare resine sintetiche veniva usata la zeolite, un minerale, facente parte degli alluminio silicati con una struttura cristallina a tetraedro. Le resine a scambio ionico sono usate a livello domestico ma anche a livello industriale nella purificazione dello zucchero e nell'estrazione di oro, argento e uranio da altri minerali. Le resine che vengono usate sono classificate in base al gruppo funzionale: debolmente basico, basato su gruppi amminici primari, secondari e terziari; debolmente acido creato con acidi del gruppo carbonilico; fortemente basico formato da composti amminici quaternari e fortemente acido formato da acido solforico. Le resine acide, dette anche resine cationiche, liberano  $\text{H}^+$  dopo aver assorbito ioni positivi ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) andando a ridurre la durezza dell'acqua e ad aumentare il pH. Allo stesso modo le resine basiche, dette resine anioniche, vanno ad assorbire ioni negativi ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) e liberare  $\text{OH}^-$ . L'acqua salina viene prima fatta passare per le resine acide (debolmente e fortemente acide) andando ad aumentare il pH. È richiesto l'uso di un

degassatore a base di bicarbonati che reagendo con gli  $H^+$  presenti nell'acqua produca  $CO_2$ . Dopo questa fase l'acqua passa attraverso le resine basiche (debolmente e fortemente basiche) e in alcuni casi in un'ulteriore resina composta da un mix di acidi e di basi per completare la rimozione degli ioni. Dopo molti cicli le resine tendono a saturarsi a causa del continuo scambio di ioni, perciò periodicamente si esegue una rigenerazione attraverso l'uso di soluzioni acide, come  $H_2SO_4$  e  $HCl$  per le resine acide e  $NaOH$  e  $NH_4OH$  per le resine basiche.

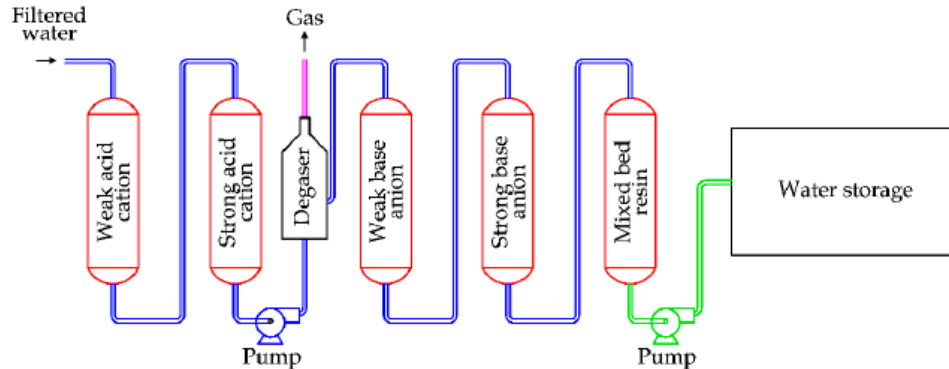


Figure 7 Schema di un desalinizzatore con resine a scambio ionico [2]

### 1.3 Uso a livello mondiale

L'uso di impianti di desalinizzazione per la produzione di acqua dolce è molto diffuso in numerose aree geografiche del globo, arrivando a più di 17.000 unità esistenti. Di questi, più della metà sono concentrati in Medio Oriente, con l'Arabia Saudita al primo posto per la produzione di acqua desalinizzata con una capacità produttiva superiore a 80 milioni di  $m^3$ /giorno. Tra i paesi maggior produttori troviamo, dopo l'Arabia Saudita, Stati Uniti, Africa del nord, Spagna, Cina e recentemente anche India e Israele, zone dove la domanda di acqua potabile è quasi sempre superiore all'effettiva disponibilità [9]. La maggior parte dei desalinizzatori sono posti lungo la costa e usano l'acqua marina come fonte idrica (61%), acque salmastre (21%), acque di superficie (8%) oppure altre fonti come acque reflue (10%). Tenendo conto di una capacità di produzione mondiale, pari a  $95,37 \cdot 10^6$   $m^3$ /giorno, la tecnologia più usata è l'osmosi inversa (68,7% di produzione) seguita poi dalla distillazione multi-stadio (17,6%), distillazione multi-effetto (6,9%), nanofiltrazione (3,4%), elettrodialisi (2,4%), ed alte tecnologie (1,0%) [3]. In Italia sono presenti impianti di desalinizzazione al meridione e nelle isole come ad esempio l'isola di Lampedusa. L'isola situata a 205 km dalla costa Sicula e 167 km dalla costa Tunisina, ha un'estensione di circa 20,6  $km^2$  ed è regolarmente colpita da scarsità idrica, perciò è stato installato nel 1973 un impianto di desalinizzazione ad osmosi inversa, con una portata nominale di 450  $m^3$  al giorno. Viene alimentato dalla centrale elettrica locale che usa combustibile fossile regolarmente trasportato dalla Sicilia [12].

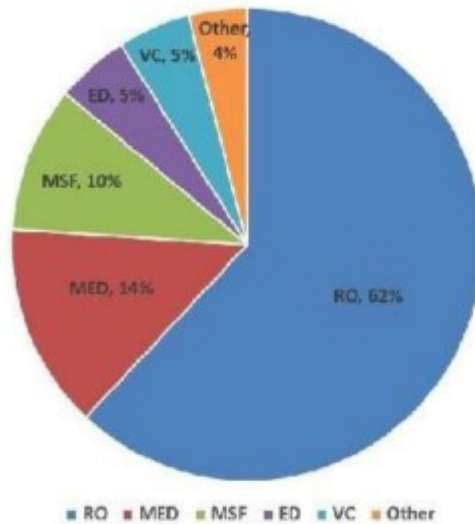


Figura 8 Percentuale delle diverse tecnologie utilizzate [32]

Nonostante i molti impianti di desalinizzazione dell'acqua marina, per scopi agricoli, viene usata principalmente acqua salmastra desalinizzata, mentre l'uso in agricoltura di acqua marina desalinizzata è limitata in Spagna e Israele, nell'ultimo ventennio. Nella penisola iberica a metà degli anni 90 si verificò un periodo di siccità che spinse molti agricoltori ad installare impianti di desalinizzazione. Da allora il numero di impianti crebbe notevolmente portando il governo Spagnolo ad approvare, nel 2004, il programma AGUA che mirava alla produzione di 694.000 m<sup>3</sup>/anno di acqua attraverso 20 nuovi impianti. Ad oggi alcuni impianti sono operativi come Valdelentisco (48.000 m<sup>3</sup>/anno) altri sono in fase di avvio (Torrevieja, 80.000 m<sup>3</sup>/anno) e altri addirittura inattivi come ad Andratx (4.900 m<sup>3</sup>/anno). A partire dal 2014 molti impianti sono rimasti inattivi a causa della difficoltà di fornire loro l'energia elettrica, il mancato completamento degli emissari per la salamoia e la mancanza di una rete di distribuzione verso le zone irrigue dell'entroterra [2]. In Spagna il costo della desalinizzazione viene ottimizzato attraverso l'uso di sei regimi di prezzo differenti per l'energia elettrica, inoltre i costi vengono ulteriormente ridotti andando a mescolata acqua desalinizzata con acqua di altre fonti [13]. Così come la Spagna anche Israele ha dovuto affrontare un'estrema scarsità idrica che ha costretto alla ricerca di nuove fonte idriche. Nel 2005 e poi nel 2007 sono stati costruiti due impianti di desalinizzazione (Ashkelon e Palmachim, 100 e 30 Mm<sup>3</sup>/anno) per fornire acqua potabile alla regione che, a causa della sua bassa densità di popolazione, viene usata per scopi agricoli. Un altro impianto di 100 Mm<sup>3</sup>/anno è stato costruito nel 2009 mentre nel 2014 si prevedeva di produrre fino a 600 Mm<sup>3</sup>/anno.

Nonostante i numerosi impianti di desalinizzazione non esiste, a livello mondiale, una regolamentazione formale che regoli la qualità dell'acqua prodotta con desalinizzatori, ma ci si limita ad essere conforme alla normativa sull'acqua potabile. Solo le autorità d'Israele hanno regolamentato la qualità dell'acqua desalinizzata sia per l'uso umano sia per l'uso agricolo attraverso molti parametri [2].

## 2 Vantaggi della desalinizzazione

L'acqua marina desalinizzata presenta alcuni vantaggi che la rendono una fonte idrica importante per la coltivazione in molte zone critiche del mondo. Gli impianti di

desalinizzazione offrono la possibilità di avere acqua potabile in aree costiere senza fornitura d'acqua dolce oppure in aree con riserve limitate. L'uso di acqua desalinizzata offre molti vantaggi come la disponibilità idrica per l'agricoltura irrigua, la possibilità di coltivare anche in aree geografiche aride o semiaride, l'uso di fonti rinnovabili sia direttamente che indirettamente per fornire l'energia richiesta e la possibilità di rigenerare il ciclo dell'acqua.

### **2.1 Superfici e fonti di approvvigionamento idrico per l'agricoltura.**

A livello mondiale le zone aride e semiaride coprono circa il 30% delle terre emerse con una superficie totale di circa 50 milioni di km<sup>2</sup>. In queste zone il livello di precipitazione è molto basso, se non pari a zero, e non è presente nessun volume di acqua potabile, perciò sia la vita umana che la coltivazione risultano essere impossibili. Con l'avvento del cambiamento climatico queste aree andranno ad aumentare sia in estensione sia in altitudine trasformando aree ricche di fonti idriche in zone aride o semiaride. Quindi la possibilità di usare l'acqua di mare come fonte idrica, per l'agricoltura, permette la coltivazione di zone costiere aride fornendo così una buona parte del cibo richiesto dalla popolazione in crescita.

### **2.2 Fonti di energia rinnovabile**

Tutti gli impianti di desalinizzazione utilizzano una fonte di energia per il loro funzionamento. L'energia usata è stata notevolmente ridotta negli ultimi decenni ma si aggira sempre attorno ai 3 kW/m<sup>3</sup> (da 1,8 fino a 3 kW/m<sup>3</sup>), ma nel caso di processi a osmosi inversa può arrivare fino a 7 kW/m<sup>3</sup>, a causa di importanti fasi di post e di pre-trattamento. Queste variazioni del consumo di energia sono legate a diversi fattori tecnici come la salinità dell'acqua in alimentazione e la qualità dell'acqua prodotta [2]. Ad oggi l'energia elettrica usata per desalinizzare l'acqua deriva quasi tutta da fonti fossili, solo 1% dell'acqua desalinizzata prodotta deriva da processi alimentati con fonti rinnovabili. Per la produzione di 1000 m<sup>3</sup> di acqua desalinizzata al giorno si arriva a consumare circa 10.000 tonnellate di prodotti petroliferi all'anno contribuendo notevolmente all'emissioni di gas serra [15, 16]. L'elevato consumo di fonti fossili ha spinto a cercare fonti di energia alternative usando le energie rinnovabili; questo fattore viene rinforzato dagli accordi della Conferenza delle Parti (COP21) tenutasi a Parigi alla fine del 2015.

Ad oggi le fonti rinnovabili più usate, negli impianti di desalinizzazione alimentati con energia rinnovabile, sono il solare (più della metà degli impianti), l'eolico, il geotermico e la combinazione solare-eolico. Nella scelta della fonte energetica più adatta bisogna considerare molti fattori come gli aspetti economici, ambientali e di disponibilità della fonte stessa. Nelle regioni più aride, dove si presenta maggiormente il problema della scarsità idrica, presentano spesso una forte intensità di radiazione solare permettendo di accoppiare sistemi di dissalazione tradizionali con impianti solari. Inoltre, nel caso di uso dell'energia solare il picco di produzione si presenta nei mesi estivi quando la richiesta di acqua è più elevata [15]. L'energia solare, come altre fonti rinnovabile, presenta il grande problema di essere discontinua, ma si può ovviare a questo problema con l'uso di accumulatori per immagazzinare l'energia. A causa dell'elevato costo degli accumulatori, dei moduli solari e l'intermittenza di produzione, l'uso di impianti al 100% a base di energia rinnovabile sono usati in applicazioni remote ed in piccola scala [17].

Per quanto riguarda l'energia solare si distinguono due gruppi: i sistemi diretti e i sistemi indiretti. Nei primi l'energia solare viene usata direttamente per attuare il processo di desalinizzazione come nel caso di impianti *solar still*, *solar chimney* ed umidificazione e



deumidificazione; mentre nel caso di sistemi indiretti l'energia solare viene convertita in energia elettrica per poi essere usata nei sistemi tradizionali, sopra descritti.

Negli impianti *solar still*, l'energia solare viene usata per fare evaporare l'acqua posta all'interno di una vasca chiusa con una copertura di vetro. La radiazione solare entra attraverso il vetro e rimane intrappolata nella camera facendo evaporare l'acqua marina e generando vapore acqueo che successivamente viene fatto condensare generando acqua dolce. Questo sistema si adatta bene a zone remote poiché richiede grandi superfici e produce una modesta quantità d'acqua dolce [9]. Nel caso di sistemi *solar chimney* l'energia solare fa evaporare l'acqua di mare, come nel *solar still*, facendola salire lungo un camino dove aziona una turbina per generare corrente elettrica e sulla cima di questa viene condensata ottenendo l'acqua dolce [18].

Nei sistemi indiretti la radiazione solare viene usata attraverso conversione in energia elettrica oppure come fonte di energia termica, negli impianti tradizionali. Nei sistemi a distillazione multi-effetto e multi-stadio nella prima fase del processo viene utilizzato acqua calda o vapore per scaldare l'acqua marina, questa può essere prodotta da pannelli solari termici. Negli altri sistemi si utilizzano pannelli fotovoltaici che, attraverso un inverter generano corrente alternata per alimentare le pompe e gli altri componenti presenti nei vari sistemi, oppure caricano direttamente gli accumulatori, se presenti. Nel caso dell'elettrodialisi l'energia prodotta dai pannelli viene utilizzata direttamente come corrente continua per il funzionamento delle resine che assorbono gli ioni, mentre viene utilizzata in corrente alternata per il funzionamento degli altri componenti [15, 9]. Tra le altre fonti rinnovabili troviamo l'eolico, può essere usato sia per la produzione di corrente oppure per la compressione meccanica dei fluidi, ed il geotermico, usato come fonte di calore soprattutto negli impianti MED che richiedono temperatura di lavoro più bassa. Molto usato è l'ibrido solare-eolico, infatti le loro caratteristiche complementari permettono un buon accoppiamento [15, 16].

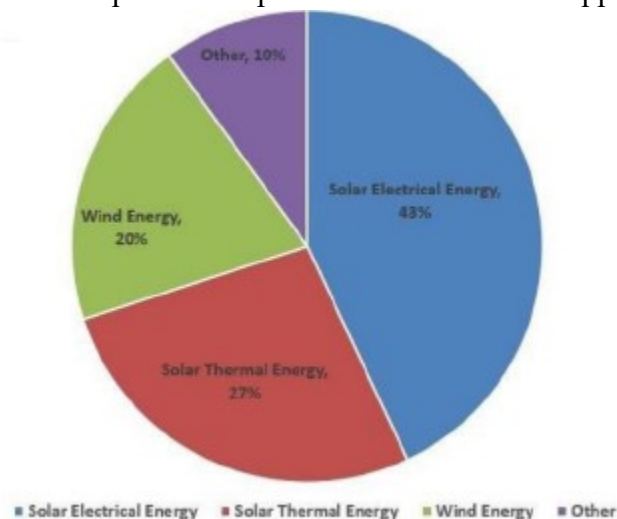


Figura 9 Percentuale delle diverse fonti rinnovabili che vengono utilizzate [32]

### 2.3 Rigenerare il ciclo dell'acqua

La desalinizzazione, oltre ad essere un grande vantaggio per la coltivazione, va ad integrare il naturale ciclo dell'acqua. Dopo il primo utilizzo per la crescita delle piante l'acqua desalinizzata, che viene distribuita, evapora andando ad aumentare l'umidità presente nella zona e di conseguenza ad alimentare le precipitazioni. In natura l'acqua viene riciclata con un valore pari al 57%: considerando 1 m<sup>3</sup> di superficie traspirante, si liberano fino a 570 litri, che



andranno a precipitare a terra come pioggia [17], allo stesso modo l'acqua desalinizzata viene riciclata con la stessa percentuale andando a integrare il ciclo dell'acqua. Le precipitazioni sono inversamente correlate al run-off superficiale dell'acqua distribuita, ma si può stimare da 800 (quando il run-off è pari al 50%) fino a 1300 litri/m<sup>3</sup> (quando lo scorrimento superficiale è pari a 0) [17]. A livello mondiale il riciclo dell'umidità aumenta le risorse di acqua dolce di un valore di 1,67, mentre a livello locale questo valore può essere di fattore tre (come nel Sud America) oppure di fattore dieci (Cina occidentale) [19]. Il riciclo dell'umidità non avviene a livello locale a causa della topografia e delle correnti d'aria che spostano l'umidità prodotta in zone sottovento. Nel sud America dove la catena montuosa delle Ande impedisce all'umidità prodotta di lasciare il continente le precipitazioni sono formate quasi totalmente dall'evaporazione, caso opposto avviene in regioni come il Mediterraneo, Stati Uniti centrali, sud Africa e Cina settentrionale dove le precipitazioni sono maggiori dell'evaporazione terrestre [19]. L'acqua desalinizzata, usata per l'irrigazione di boschi o colture, nelle regioni sopravvento contribuisce ad aumentare le precipitazioni nelle zone sottovento senza diminuire le riserve locali di acqua dolce [17].

A causa del cambiamento climatico e dei cambiamenti nella copertura del suolo potrebbero causare, o già esserne la causa, di alterazioni del ciclo dell'acqua che si osservano nelle regioni mediterranee. L'uso di acqua desalinizzata per l'irrigazione agricola, e la sua successiva immissione nel ciclo, potrebbero rallentare questi fenomeni.

### **3 Svantaggi della desalinizzazione**

I sistemi di desalinizzazione presentano numerosi punti a sfavore sia a livello agronomico, energetico ed ambientale. A livello agronomico i problemi maggiori si riscontrano nella mancanza di elementi fondamentali per la crescita delle colture oppure la presenza troppo elevata di altri elementi, creando problemi di fitotossicità, di tossicità e di salinità. Nel caso delle problematiche ambientali si riscontrano difficoltà nella gestione della salamoia, dell'impatto sugli ecosistemi marini e la produzione di gas serra.

#### **3.1 Problemi agronomici**

##### **3.1.1 Mancanza di elementi nutrienti**

L'acqua prelevata da fonti idriche naturali, oltre ad avere funzione umettante, ha anche funzione fertilizzante perché disciolti nell'acqua sono presenti molti minerali essenziali per la crescita delle colture. Nel caso dell'acqua desalinizzata questi minerali sono rimossi insieme ai sali indesiderati, perciò sono assenti oppure sono presenti in concentrazioni molto basse rispetto ai livelli normali. Gli elementi essenziali mancanti che vengono maggiormente studiati sono il calcio, rilevato come ione  $\text{Ca}^{2+}$ , il magnesio, come ione  $\text{Mg}^{2+}$ , e lo zolfo, come solfato  $\text{SO}_4^{2-}$ . Nel caso del calcio la richiesta media per le colture orticole è compresa tra 80 e 120 mg L<sup>-1</sup>, nell'acqua da fonti naturali contiene da 50 a 100 mg L<sup>-1</sup> rispetto agli impianti di desalinizzazione dove è in media 35 mg L<sup>-1</sup>, ma può variare notevolmente, come nel caso degli impianti Spagnoli dove il valore è più basso. Per il magnesio la richiesta per la crescita delle colture è di 30-35 mg L<sup>-1</sup>, pari alla concentrazione nelle acque naturali, mentre nelle acque desalinizzate la concentrazione è molto inferiore tra 0 e 5,5 mg L<sup>-1</sup>; nel caso del solfato la richiesta è di circa 100-150 mg L<sup>-1</sup>, soddisfatta dalle acque naturali, mentre nel caso dell'acqua desalinizzata il valore è compreso tra 10 e 50 mg L<sup>-1</sup> [2].

Il calcio ricopre un ruolo di grande importanza nell'allungamento e nella divisione delle cellule vegetali, garantisce resistenza meccanica agli steli delle piante ed interviene nel metabolismo dell'azoto e nel trasporto dei carboidrati [20]. Una volta depositato nei tessuti diventa immobile,

quindi non traslocabile, perciò deve essere presente un apporto costante di calcio. La carenza di questo nutriente determina una crescita stentata con morte degli apici meristemati, riduzione della resa, frutti di scarsa qualità, deformazioni e clorosi delle foglie. In genere la concentrazione di calcio nelle foglie è tra 2 e 10 g kg<sup>-1</sup> [24].

Nelle colture agricole il magnesio è un elemento indispensabile per la crescita delle piante, infatti il magnesio è presente all'interno delle foglie verdi. La clorofilla è il pigmento responsabile della colorazione verde delle foglie presente all'interno dei cloroplasti, questa presenta una struttura ad anello con un atomo di magnesio al centro per evitare la dispersione dell'energia solare e una coda che si diparte dall'anello [21]. All'interno della pianta è presente come catione bivalente in forma solubile con una concentrazione variabile tra 1 e 4 g kg<sup>-1</sup> di foglie sane [24]. La mancanza di questo elemento provoca decolorazioni internervali che successivamente dissecano, nei casi più gravi solo le nervature primarie e secondarie rimangono bordate [22].

Lo zolfo che viene assorbito come fosfato è essenziale per la produzione di amminoacidi, come la cisteina, proteine, vitamine, enzimi e la clorofilla, inoltre svolge un ruolo importante nel bilanciamento idrico, nel metabolismo e nella sintesi della clorofilla. Lo zolfo, come solfato, viene assorbito insieme ad altri elementi come ferro (solfato di ferro), potassio (solfato di potassio), azoto (solfato ammonico). L'assorbimento di questo elemento varia molto in base alla coltura, come nel caso delle brassicacee che assorbono fino a 100 kg ha<sup>-1</sup>, infatti si possono trovare concentrazioni fogliare 1,5-4,5 kg ha<sup>-1</sup> fino ad un massimo di 11-17 kg ha<sup>-1</sup> nel caso delle brassicacee [24]. La carenza si manifesta con decolorazione del fogliame che diventa verde chiaro fino a giallo nei casi più estremi, per poi far ingiallire anche le nervature [23].

La mancanza di questi nutrienti nell'acqua desalinizzata possono essere aggiunti in 3 modi principali: vengono aggiunti nei post-trattamenti che vengono eseguiti dopo la desalinizzazione, possono venir aggiunti dagli agricoltori con i fertilizzanti, soprattutto in terreni con bassa mineralizzazione o colture fuori suolo, oppure miscelando l'acqua desalinizzata ad acque naturali ricche di sali. Tutto ciò comporta un costo aggiuntivo che deve essere valutato in base alla resa della coltura prodotta e al costo [2].

### **3.1.2 Fitotossicità del Boro**

Il boro è un micronutriente fondamentale per la normale crescita delle colture agricole. Viene usato per la formazione della parete cellulare, per dare integrità alla membrana, favorisce l'assorbimento del calcio e aiuto nel trasporto degli zuccheri. Inoltre, svolge molte funzioni come favorire la fioritura, germinazione del polline, fruttificazione, divisione cellulare e la produzione di ormoni. La concentrazione di questo elemento nelle piante varia da 6 a 60 mg kg<sup>-1</sup>; rispetto a molti altri elementi essenziali non viene assorbito come ione ma come acido borico non dissociato (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) [24]. Nonostante sia fondamentale per lo sviluppo delle colture può diventare tossico quando la quantità è leggermente superiore alla concentrazione ottimale. Il boro ha effetto nei tessuti meristemati, infatti la sua carenza provoca la morte degli apici meristemati, sia dell'apparato aereo che dell'apparato radicale, inoltre provoca clorosi nelle giovani foglie e varie malformazioni. Nel caso della soia le foglie appaiono striate con macchie bianche internervali; nel caso del girasole le giovani foglie diventano bianco argentate specialmente nella parte basale. A differenza della carenza la tossicità di boro si manifesta prima sulle foglie basali formando screziature sulla punta e sui lati della foglia seguita poi dalla morte del tessuto [25]. La concentrazione ottimale per la crescita delle colture è compresa tra 0,5 e 0,7 ppm ma può variare molto: nel caso del girasole abbiamo un optimum di crescita con 0,5 ppm, 0,7 ppm per la lattuga, 0,4 ppm per il tabacco. Allo stesso modo la concentrazione

tossica di boro può variare molto in base alla coltura: la soia presenta i primi segni di tossicità a concentrazioni tra 0,1 e 0,2 ppm sebbene la morte arrivasse solo a concentrazioni superiori a 2,5 ppm, nell'orzo la tossicità si verifica a concentrazioni di 0,06 ppm, nel girasole sopra 1,0 ppm, la lattuga presenta i primi sintomi a 0,9 ppm con la morte a 1,2 ppm, la fava presenta sintomi di tossicità a concentrazioni superiori a 1,6 ppm. D'altra parte sono presenti alcune colture come pisello e orzo che riescono a concludere l'intero ciclo vitale senza la necessità di assorbire boro [25].

L'elevato contenuto di boro nell'acqua desalinizzata è causato dall'elevata concentrazione nell'acqua marina con concentrazioni tra 4,5 e 6 mg L<sup>-1</sup> a differenza dell'acqua naturale (0-1,5 mg L<sup>-1</sup>) e dalla forma chimica presente nell'acqua di mare, infatti si presenta come acido borico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) che non presenta carica ionica.

La rimozione può avvenire a pH neutro o a pH acido, nel primo caso dopo il processo di osmosi inversa vengono usate resine a scambio cationico mentre nel secondo caso il permeato generato da processi di osmosi inversa viene acidificato e viene nuovamente filtrato attraverso l'osmosi inversa. Il boro a pH neutro si presenta come acido borico non dissociato che, dopo la filtrazione con osmosi inversa, viene rimosso con particolari resine selettive che legano il boro liberando uno ione dalla resina, perciò queste devono essere periodicamente ripristinate attraverso l'uso di acido cloridrico o solforico [26]. Quando il pH viene portato oltre il 10, attraverso l'uso di soda caustica, l'acido borico si dissocia in borato H<sub>3</sub>BO<sub>2</sub><sup>-</sup> che può essere rimosso con un ulteriore passaggio all'osmosi inversa, con un'efficienza pari al 90%, oppure su un successivo passaggio con resine a scambio cationico [26].

La concentrazione di boro nell'acqua desalinizzata non è regolamentata a livello mondiale e può variare di molto nei vari paesi. In Israele viene fissato il limite a 0,3 mg L<sup>-1</sup>, in modo da proteggere anche le colture più sensibili, mentre in Spagna il limite, fissato da programma AGUA, è pari a 0,5 mg L<sup>-1</sup> così come è suggerito dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS). Il valore fissato dalla Spagna potrebbe creare problemi di tossicità anche ai frutteti che sono molto presenti nel sud-est della penisola iberica [2].

### 3.1.3 Tossicità del Cl e del Na

L'acqua di mare contiene molti sali in percentuali molto variabili tra loro. Più del 50% dei sali presenti nell'acqua marina è rappresentato dal cloruro di sodio, che in acqua si dissocia come Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>. Questi ioni rimangono predominanti anche dopo il processo di desalinizzazione creando possibili problemi di fitotossicità a molte colture, soprattutto arboree. A differenza delle colture arboree le colture erbacee sono mediamente più tolleranti ma si possono verificare bruciature delle foglie e necrosi degli apici e dei bordi fogliari. Nel caso di irrigazione a pioggia possono essere assorbiti dalle foglie causando danni fogliari acuti soprattutto con condizioni di alta temperatura e bassa umidità relativa [2]. Il cloro viene assorbito dalle piante in piccole concentrazioni come nutriente, infatti, la sua carenza provoca in molte colture avvizzimento, riduzione della crescita e della resa [27]. Il sodio, spesso associato al cloro, viene assorbito come micronutriente andando ad influenzare la produzione delle colture, sia di biomassa sia di resa, ma anche mantenimento del colore delle foglie per periodi più lunghi e una manifestazione di carenze meno marcate, come clorosi e necrosi. Elevate concentrazioni di sodio possono provocare la riduzione della crescita, riduzione dell'attività fotosintetica e minor produzione di clorofilla. Il sodio in elevate concentrazioni interferisce con l'assorbimento di altri nutrienti come potassio e calcio. È stato dimostrato che il sodio blocca i canali di membrana per l'assorbimento del potassio causandone una diminuzione all'interno della cellula. Questo

genera un aumento delle concentrazioni nel citoplasma cellulare portando ad uno sfasamento ionico e generando problemi di tossicità alla cellula. [28].

Nel caso di acqua desalinizzata prodotta dagli impianti israeliani non abbiamo rischi di fitotossicità da cloro e sodio grazie ai bassi valori che vengono fissati; nel caso spagnolo è presente un rischio moderato soprattutto per i frutteti che sono molto presenti nel sud-est della penisola iberica. Esperienze a medio o lungo termine, come nel caso dell'isola di Lanzarote nell'arcipelago delle Canarie, suggeriscono che la sostenibilità di queste pratiche richiedono maggior controlli nell'acqua di irrigazione e l'aumento della lisciviazione dei sali, per impedire l'aumento di salinità dei terreni [2].

#### **3.1.4 Salinità dei terreni**

L'uso di acqua desalinizzata, con contenuto modesto di sali, per finalità irrigue può provocare la salinizzazione dei terreni con conseguente calo di produttività legata alla perdita di fertilità e peggioramento della struttura del terreno. In Europa si stima che circa 1 milione di ettari sia colpito da salinità, soprattutto nell'area mediterranea, e potrebbe peggiorare a ritmi elevati nei prossimi anni a causa dell'aumento delle aree coltivate e la mancanza di fonti idriche di buona qualità. Si prevede, infatti, che a livello mondiale nel 2050 circa la metà delle terre coltivabili sarà colpita da problemi di salinità [29].

La salinità del suolo interferisce con la crescita di molte colture agricole, soprattutto orticole, che sono meno resistenti, come spinaci, carote, lattuga, cipolle ma anche colture come le patate e il riso. La salinità crea un aumento della pressione osmotica del suolo andando a ridurre la capacità delle piante di assorbire elementi nutritivi, come  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NO_3^-$ , creando squilibri nutrizionali per la mancanza di nutrienti, ma anche riducendo l'assorbimento di acqua, creando un effetto molto simile all'avvizzimento. La riduzione della produzione per effetto della salinità può essere divisa in due fasi: nella prima fase, molto rapida, si osserva una riduzione della crescita indotta dal deficit idrico, mentre la seconda, più lenta, è attribuita all'effetto tossico dovuto all'accumulo di sali. Le due fasi sono difficili da valutare in modo separato a causa dell'assenza di una netta divisione tra le due [29]. A livello visivo si osserva prima un avvizzimento con foglie ingiallite e successivamente clorosi delle parti verdi con sintomi da carenza degli elementi che vengono bloccati dalle alte concentrazioni di sale. A basse concentrazioni, invece, si osservano effetti positivi su alcune colture come un aumento della resa negli spinaci, maggior contenuto zuccherino nelle carote, maggior resistenza del sedano al cuore nero, minor contenuto in amido nelle patate [30]. Gli effetti della salinità sono influenzati anche dal momento di applicazione dello stress, soprattutto nei momenti di alta temperatura e bassa umidità relativa, cioè quando si effettua l'irrigazione.

La presenza di sali nel terreno, oltre a ridurre la produzione delle colture, va a degradare la struttura fisica del terreno, diminuendo la fertilità e favorendo la desertificazione. In un terreno con buona dotazione di sostanza organica, cationi bivalenti come il  $Ca^{2+}$  e il  $Mg^{2+}$  creano microaggregati stabili, andando a legare i composti unici prodotti dalla sostanza organica con le particelle di argilla. Questi sono alla base della struttura del suolo andando ad aumentarne la porosità, il drenaggio e la fertilità. Un alto livello di sodio scambiabile nel terreno (EPS) crea un impatto sulla struttura del terreno andando a sostituirsi al calcio e al magnesio adsorbiti causando la rottura della struttura del suolo [29]. La salinità del suolo viene solitamente misurata come unità di conducibilità elettrica (EC) oppure come rapporto di adsorbimento del sodio (SAR). La conducibilità elettrica viene misurata come deciSiemens per metro ( $dS\ m^{-1}$ ) oppure come mollimhos per centimetro ( $mmho\ cm^{-1}$ ). Secondo la tassonomia del suolo USDA un suolo viene definito salino quando la conducibilità elettrica dell'estratto, ricavata nei primi

15 cm, supera almeno i 30 dS m<sup>-1</sup>, rispetto ad un valore ottimale che varia tra 0.5 fino a 3 dS m<sup>-1</sup> sulla base del tipo di terreno considerato. Il rapporto di adsorbimento del sodio, si misura attraverso le concentrazioni del sodio, del calcio e del magnesio presenti nel terreno [31].

Il permeato prodotto da sistemi a osmosi inversa in genere ha una EC intorno a 0,5 dS m<sup>-1</sup>, ed un SAR pari a 9-10 che scende attorno al 6 (negli impianti Spagnoli) o al 4 (negli impianti Israeliani) con l'aggiunta di calcio e magnesio nei processi di post trattamento. I valori di SAR Spagnoli a lungo termine possono creare problemi di salinizzazione del terreno, mentre nel caso Israeliano il rischio è molto ridotto. Il rischio di salinità del terreno è maggiore in terreni ricchi di argilla rispetto a quelli sabbiosi. Inoltre, il rischio scende ulteriormente nelle aree soggette a precipitazioni stagionali che favoriscono la lisciviazione dei sali [2].

### 3.2 Costi e consumi energetici

Il mercato degli impianti di desalinizzazione, ad oggi, si centra sul Medio Oriente e sulle regioni del golfo dove la rapida crescita e la scarsità di risorse idriche favoriscono la diffusione e l'uso di acque desalinizzate, mentre in America ed Europa sono poco diffusi a causa dell'alto costo. Tra le principali voci di costo troviamo il capitale iniziale per la costruzione, il costo energetico, il costo di manutenzione e i costi operativi. Il costo operativo è influenzato da molti fattori, che agiscono direttamente sul prezzo finale, come la salinità della fonte idrica, la disponibilità delle fonti energetiche, il tipo di tecnologia che viene usata, dimensioni dell'impianto e la presenza o meno di sussidi governativi. Gli impianti di desalinizzazione hanno un costo iniziale che varia in base alla tecnologia usata ma in media varia da 1.500 fino a 2.900 dollari per m<sup>3</sup> (MSF 1.700-2.900, MED 1.700-2.700, RO 1.300-2.500) [32]. Negli ultimi decenni la ricerca, lo sviluppo di nuove tecnologie e il miglioramento di quelle esistenti hanno ridotto il costo di produzione agendo sulla quantità di energia che viene consumata. La tecnologia più diffusa è l'osmosi inversa che presenta un consumo compreso tra 1,8 e 2,2 kWh m<sup>-3</sup> che aumenta fino 5,0-7,0 kWh m<sup>-3</sup> a causa dei grandi processi di pre e post trattamento, soprattutto nel caso dell'acqua per uso agricolo. Negli impianti situati in Spagna e Israele l'acqua che viene usata per finalità irrigue viene prodotta con un consumo energetico tra 3,70 e 4,30 kWh m<sup>-3</sup> [2]. Nei processi termici vengono maggiormente usati combustibili fossili, che portano il costo dell'acqua prodotta da grandi impianti (sopra 100.000 m<sup>3</sup> al giorno), ad un costo unitario tra 0,52 e 1,01 dollari al m<sup>3</sup>. Nei processi a membrane le nuove tecnologie hanno ridotto il consumo energetico portando ad avere un costo unitario che varia tra 0,52 dollari al m<sup>3</sup>, nell'impianto più grande al mondo in Israele (320.000 m<sup>3</sup>/giorno), e 0,56 dollari al m<sup>3</sup>, degli impianti in Florida, nel caso di uso di acqua marina mentre se si usano acque salmastre il costo sarebbe pari a 0,27 dollari al m<sup>3</sup> [14]. Il costo dell'acqua desalinizzata prodotta con energie rinnovabili risulta essere superiore rispetto a fonti tradizionali: nel caso di acqua di mare il costo di produzione con energia eolica è compreso tra 1,3 e 6,5 dollari al m<sup>3</sup> mentre nel caso di pannelli solari il costo varia da 4,08 e 11,70 dollari al m<sup>3</sup> [14]. Questa differenza di costo è dovuta all'elevato costo di installazione di impianti per la produzione di energia rinnovabile e degli impianti di accumulo, quando sono presenti.

Il costo finale di vendita dell'acqua desalinizzata comprende, oltre al costo iniziale ed il costo energetico, anche il costo di manutenzione degli impianti. Gli impianti di desalinizzazione con processi termici sono soggetti alla formazione di incrostazioni sugli scambiatori di calore e alla corrosione dei condotti che, dopo numerosi cicli, devono essere sostituiti per garantire il corretto funzionamento e l'efficienza degli impianti stessi. Nel caso di processi a membrana la manutenzione consiste in processi attuati per rigenerare la membrana, rimuovendo i depositi

che si sono formati su di esse. Caso particolare sono le resine a scambio cationica che a cicli periodici devono essere rigenerate, andando a rimuovere gli ioni che sono adsorbiti [1, 17]

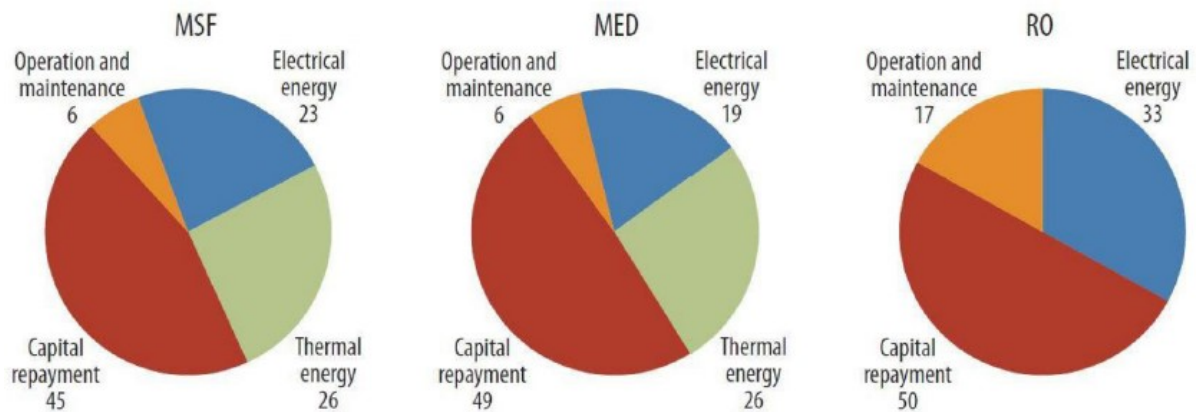


Figura 10 Percentuali di costo per le diverse tecnologie [32]

I costi della desalinizzazione risultano essere ancora eccessivi per molte aree non molto sviluppate e per la produzione di colture su larga scala. Per le colture in serra o alteramente specializzate l'aumento di costo dovuto dall'uso di acqua desalinizzata viene coperto dal guadagno finale generato dalla vendita del prodotto, per le colture in pieno campo, con un basso margine di guadagno il costo di uso dell'acqua desalinizzata non giustifica il costo del prodotto finale [2].

L'applicazione di un'adeguata tariffazione, a livello governativo, garantisce la possibilità di creare margini finanziari così da permettere a molti soggetti di poter sfruttare questa fonte [17].

### 3.3 Impatto ambientale

Dal punto di vista ambientale gli impianti di desalinizzazione su larga scala presentano potenziali problematiche a livello ambientale. Le interferenze con gli ecosistemi marini, per il prelievo e lo scarico di grandi volumi d'acqua e l'emissione di inquinanti a livello atmosferico sono le principali preoccupazioni ambientali legate alla desalinizzazione [33]. Gli impianti di desalinizzazione possono ricevere l'acqua di alimentazione da molte fonti ma la più diffusa è l'acqua di mare. Le tubazioni di aspirazione dell'acqua possono generare molti problemi come la perdita di organismi acquatici, che urtano o vengono trascinati all'interno dei sistemi di aspirazione, la modifica dei fondali marini, riportando in movimento sedimenti, sostanze inquinanti presenti sui fondali, ma anche la modifica degli scambi idrici con possibile alterazione delle rotte marine [34]. Gli impianti di desalinizzazione oltre a prelevare l'acqua marina scaricano in mare la salamoia, residuo della lavorazione. La salamoia che viene immessa in mare presenta una salinità maggiore rispetto alla normale acqua di mare di un valore pari a 1,3-1,7 volte, maggior temperatura, presenza di residui chimici, prodotti dai pre e post trattamenti e metalli pesanti originati dalla corrosione. La salamoia che viene scaricata genera un aumento della salinità nelle vicinanze di 5-10 ppm [34] generando problemi per alcune piante che vivono sui fondali marini; nei fondali delle coste mediterranee Spagnole sono presenti 5 tipi diversi di angiosperme, tra cui la più diffusa è la *Posidonia oceanica* che, a causa dello scarico della salamoia, sta subendo una notevole regressione [35]. Oltre alla concentrazione di sale si riscontra anche un aumento della temperatura superiore di 7-8 °C rispetto all'ambiente, andando a generare un cambiamento delle specie nel sito in questione che possono essere attratte o meno alle nuove condizioni ambientali [33, 34]. La salamoia che viene immessa in mera porta con sé anche molti inquinanti come il

cloro, tra 200-500  $\mu\text{g L}^{-1}$ , agenti antischiuma, antincrostanti, metalli pesanti e altri prodotti chimici usati nella pulizia degli impianti [33].

Gli impianti di desalinizzazione sono responsabili della produzione indiretta di gas serra. La maggior parte degli impianti usa energia prodotta da fonti fossili che producono gas serra; in Spagna le centrali termoelettriche producono 0,402 kg di  $\text{CO}_2$  per ogni kWh che viene prodotto [35]. La produzione indiretta di gas serra potrebbe essere ridotta o annullata grazie all'uso di energia rinnovabili come impianti fotovoltaici, solari termici, eolico.

Tra le problematiche ambientali si riscontra anche l'impatto del suono, infatti l'uso di pompe o turbine producono livelli di rumore sopra i 90 dB, ma anche impatti sull'uso di suolo, basti pensare che un impianto che produce tra 5.000 e 10.000  $\text{m}^3/\text{giorno}$  occupa una superficie di circa 1 ha [35]. Per questi motivi gli impianti di desalinizzazione si trovano in aree costiere lontane dalle zone abitate.

#### **4 Conclusione**

Nel mondo la disponibilità d'acqua dolce, per il consumo o per la produzione di cibo, sono fondamentali alla sopravvivenza dell'essere umano. Con i nuovi scenari che si stanno manifestando come l'aumento della popolazione, cambiamenti climatici e la crescita industriale sta crescendo la pressione sulle risorse idriche esistenti. L'uso di impianti di desalinizzazione permette di diminuire la pressione sulle fonti d'acqua dolce presenti e di mantenere costante, o aumentare la produzione agricola, anche in zone dove le fonti idriche scarseggiano. L'acqua desalinizzata presenta notevoli vantaggi per la produzione agricola, ma sono presenti anche importanti aspetti negativi che bloccano l'uso di queste tecnologie. Tra le più importanti vi sono problematiche ambientali riguardanti sia le colture, con problemi di fitotossicità, sia il terreno, con rischio di salinizzazione del terreno. Oltre a problemi agronomici, si rilevano importanti problemi ambientali come l'interferenza con gli ecosistemi marini e la produzione di gas serra. Per questi motivi, gli impianti di desalinizzazione devono essere studiati e gestiti al meglio per ridurre al minimo queste problematiche. Nel caso delle problematiche agronomiche vi sono accorgimenti per ridurre il problema come l'uso di colture più resistenti al boro, al cloro e al sodio e alla salinità oppure l'aggiunta di volumi provenienti da fonti desalinizzate a fonti naturali, per aumentare la dotazione di nutrienti e per ridurre l'effetto fitotossico. Un altro punto da valutare è l'impatto ambientale che può essere risolto con opportuni accorgimenti come l'installazione e l'uso di energia da fonti rinnovabili, prestando attenzione alla zona in cui si preleva e si scarica l'acqua.

## Bibliografia

1. DARRE, Natasha C.; TOOR, Gurpal S. Desalination of water: a review. *Current Pollution Reports*, 2018, 4: 104-111.
2. MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; MARTIN-GORRIZ, B.; SOTO-GARCÍA, M. Seawater desalination for crop irrigation—A review of current experiences and revealed key issues. *Desalination*, 2016, 381: 58-70.
3. CURTO, Domenico; FRANZITTA, Vincenzo; GUERCIO, Andrea. A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences*, 2021, 11.2: 670.
4. DIFFENBAUGH, Noah S., et al. Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34.11.
5. GOSLING, Simon N.; ARNELL, Nigel W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 2016, 134: 371-385.
6. WHEELER, Tim; KAY, Melvyn. Food crop production, water and climate change in the developing world. *Outlook on Agriculture*, 2010, 39.4: 239-243. <https://doi.org/10.5367/oa.2010.0017>
7. BRAGAGLIA, DANIELE. Cambiamento climatico e sostenibilità: il ruolo dell'agroecologia.
8. <https://www.arpa.veneto.it/arpav/comunicati-stampa/archivio-comunicati/comunicati-2023/piove-ma-i-livelli-dei-fiumi-restano-bassi>
9. MUNARETTO, Igor. Simulazione di un sistema di dissalazione e generazione di energia elettrica alimentato da fonti di energia rinnovabile sull'isola di Sal.
10. BURN, Stewart, et al. Desalination techniques—A review of the opportunities for desalination in agriculture. *Desalination*, 2015, 364: 2-16.
11. LEE, Kah Peng; ARNOT, Tom C.; MATTIA, Davide. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*, 2011, 370.1-2: 1-22.
12. M. Trapanese and V. Frazitta, "Desalination in small islands: the case study of Lampedusa (Italy)," OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, Charleston, SC, USA, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604484.
13. AL JABRI, Salem Ali, et al. Comparative analysis of economic and institutional aspects of desalination for agriculture in the Sultanate of Oman and Spain. *Desalin. Water Treat.*, 2019, 156: 1-6.
14. SHATAT, Mahmoud; WORALL, Mark; RIFFAT, Saffa. Opportunities for solar water desalination worldwide. *Sustainable cities and society*, 2013, 9: 67-80.
15. GROSSI, ANDREA. Analisi di cicli termodinamici per la dissalazione con apporto di energia solare. 2017.
16. ALKAISI, Ahmed; MOSSAD, Ruth; SHARIFIAN-BARFOROUSH, Ahmad. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 2017, 110: 268-274.
17. PISTOCCHI, A., et al. Can seawater desalination be a win-win fix to our water cycle?. *Water research*, 2020, 182: 115906.
18. ZUO, Lu, et al. Solar chimneys integrated with sea water desalination. *Desalination*, 2011, 276.1-3: 207-213.
19. VAN DER ENT, Rudi J., et al. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 2010, 46.9.



20. <https://www.agrivet.it/wp-content/uploads/Agriwet-Newsletter-Nutrizione-Boro-e-Calcio-Metalosate.pdf> (27/10/2023)
21. <https://it.wikipedia.org/wiki/Clorofilla> (27/10/2023)
22. GRASSO, S. CASI DI CARENZA DI MAGNESIO IN PIANTE DI VITE IN SICILIA. *Rivista di Patologia Vegetale*, 1981, 55-60.
23. [https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/publikationen/suchen/\\_jcr\\_content/par/externalcontent.bitexternalcontent.exturl.pdf/aHR0cHM6Ly9pcmEuYWdyb3Njb3BlLmNoL2l0LUNIL1BhZ2UvRW/luemVscHVibGlrYXRpb24vRG93bmXvYWQ\\_ZWlue mVscHVibGlr/YXRpb25JZD0zMTI5NQ==.pdf](https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/publikationen/suchen/_jcr_content/par/externalcontent.bitexternalcontent.exturl.pdf/aHR0cHM6Ly9pcmEuYWdyb3Njb3BlLmNoL2l0LUNIL1BhZ2UvRW/luemVscHVibGlrYXRpb24vRG93bmXvYWQ_ZWlue mVscHVibGlr/YXRpb25JZD0zMTI5NQ==.pdf) (29/10/2023)
24. [https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/54682/essential\\_plant\\_nutrients.pdf?sequence=1](https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/54682/essential_plant_nutrients.pdf?sequence=1) (29/10/2023)
25. Scott V. Eaton, Effects of Boron Deficiency and Excess on Plants, *Plant Physiology*, Volume 15, Issue 1, January 1940, Pages 95–107, <https://doi.org/10.1104/pp.15.1.95> (29/10/2023)
26. <https://www.gestioneacqua.it/wp-content/uploads/2019/03/Esperienza-per-la-rimozione-del-boro-con-scambio-ionico-su-impianto-pilota.pdf> (29/10/2023)
27. JOHNSON, C. M., et al. Comparative chlorine requirements of different plant species. *Plant and soil*, 1957, 8: 337-353.
28. KRONZUCKER, Herbert J., et al. Sodium as nutrient and toxicant. *Plant and soil*, 2013, 369: 1-23.
29. MACHADO, Rui Manuel Almeida; SERRALHEIRO, Ricardo Paulo. Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 2017, 3.2: 30.
30. SHANNON, M. C.; GRIEVE, C. M. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia horticulturae*, 1998, 78.1-4: 5-38.
31. DAZZI, Carmelo, et al. Acque saline e qualità del suolo. *Ital. J. Agron*, 2006, 1.Suppl 3: 467-74.
32. ALKAISI, Ahmed; MOSSAD, Ruth; SHARIFIAN-BARFOROUSH, Ahmad. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 2017, 110: 268-274.
33. LATTEMANN, Sabine; HÖPNER, Thomas. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 2008, 220.1-3: 1-15.
34. DAWOUD, Mohamed A. Environmental impacts of seawater desalination: Arabian Gulf case study. *International Journal of Environment and Sustainability*, 2012, 1.3.
35. SADHWANI, J. Jaime; VEZA, Jose M.; SANTANA, Carmelo. Case studies on environmental impact of seawater desalination. *Desalination*, 2005, 185.1-3: 1-8.

Figura 1,2,3,4,5,6,7: CURTO, Domenico; FRANZITTA, Vincenzo; GUERCIO, Andrea. A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences*, 2021, 11.2: 670.

Figura 8, 9, 10: ALKAISI, Ahmed; MOSSAD, Ruth; SHARIFIAN-BARFOROUSH, Ahmad. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 2017, 110: 268-274.