

MARCO ROGNONI

LA DISSALAZIONE DELL'ACQUA DI MARE

Descrizione, analisi e valutazione delle principali tecnologie



Dario Flaccovio Editore

Marco Rognoni

LA DISSALAZIONE DELL'ACQUA DI MARE – DESCRIZIONE, ANALISI E VALUTAZIONE DELLE
PRINCIPALI TECNOLOGIE

ISBN 978-88-579-0030-8

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: giugno 2010

Rognoni, Marco <1945 ->

La dissalazione dell'acqua di mare : descrizione, analisi e valutazione delle
principali tecnologie / Marco Rognoni. - Palermo : D. Flaccovio, 2010

ISBN 978-88-579-0030-8

1. Dissalazione.

628.167 CDD-22

SBN Pal0226511.

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, giugno 2010.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano per aver collaborato alla trattazione di alcuni argomenti:

- Biniash G. per l'argomento opera di presa dell'acqua di mare (Taprogge, Germania);
- Coniglio O. per l'argomento dissalazione evaporativa (SWS, Italia);
- Dimichino F. per l'argomento corrosione (Europower, Italia);
- Gandola M. per l'argomento demineralizzazione (EGMA – Water Tech. Association Italia);
- Lanari F. per l'argomento osmosi inversa (Dow Chemical, Italia);
- Paden J.R. per l'argomento ricerca e sviluppo, SWS&GB (India).

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0030

Indice

Prefazionepag. IX

1 Dissalazione dell'acqua di mare

1.1. Introduzione	»	1
1.2. Perché dissalare	»	1
1.2.1. Disponibilità di acqua dolce	»	2
1.2.2. Popolazione mondiale	»	2
1.2.3. Fabbisogno pro capite	»	2
1.2.4. Variazioni climatiche	»	4
1.2.5. Uso industriale	»	4
1.2.6. Uso agricolo	»	5
1.2.7. Reti idriche e usi differenziati	»	7
1.2.8. Scarico zero	»	7
1.2.9. Fonti alternative di acqua dolce	»	8
1.2.10. Scenari futuri	»	8
1.3. Termodinamica della dissalazione	»	10
1.3.1. Confronto fra i consumi della dissalazione per evaporazione e per osmosi inversa	»	14
1.4. Dissalazione in natura	»	14
1.5. Dissalazione industriale	»	16
1.5.1. Cenni storici	»	16
1.5.2. Dati statistici	»	21
1.5.3. Ricerca e sviluppo	»	21
1.5.3.1. Osmosi inversa	»	23
1.5.3.2. Evaporazione	»	24
1.5.3.3. Scenario futuro	»	25
1.6. Impatto ambientale	»	28
1.6.1. Impatto termico	»	29
1.6.2. Impatto chimico	»	30
1.6.3. Impatto paesaggistico	»	30
1.7. Installazioni tipiche	»	31

2 Acqua di mare

2.1. Caratteristiche fisiche e chimiche	»	35
2.2. Fouling e incrostazioni	»	41
2.2.1. Fouling	»	42
2.2.1.1. Impianti evaporativi	»	42
2.2.1.2. Impianti o osmosi inversa	»	43
2.2.2. Incrostazioni	»	44
2.2.2.1. Impianti evaporativi	»	44
2.2.2.2. Impianti a osmosi inversa	»	46
2.3. Corrosione	»	46
2.3.1. Corrosione chimica	»	47
2.3.2. Corrosione galvanica	»	48

2.3.3. Passivazione	»	53
2.4. Erosione	»	54
2.5. Inquinanti e loro effetti	»	55

3 Tecnologie di dissalazione

3.1. Introduzione	»	57
3.2. Evaporazione	»	57
3.2.1. Tecnologie a flash.....	»	58
3.2.1.1. Flash	»	59
3.2.1.1.1. Purezza del vapore	»	60
3.2.1.1.2. Condensazione	»	60
3.2.1.2. Processo multflash (MSF)	»	60
3.2.1.2.1. Multflash con ricircolazione di salamoia e tubi trasversali	»	62
3.2.1.2.2. Multflash con ricircolazione di salamoia e tubi longitudinali	»	63
3.2.1.2.3. Multflash a passaggio semplice e tubi trasversali o longitudinali ..	»	64
3.2.2. Tecnologia a multiplo effetto (MED E MED/TVC)	»	65
3.2.2.1. Trasformatore di vapore	»	65
3.2.2.2. Schema MED (<i>multiple effect distillation</i>)	»	66
3.2.2.3. MED con termocompressore (MED/TVC)	»	68
3.2.3. Tecnologia a ricompressione meccanica (MVC)	»	72
3.2.4. Sistemi accessori degli impianti evaporativi	»	78
3.2.4.1. Sistema del vuoto	»	79
3.2.4.2. Separatore di gocce (<i>demister</i>)	»	82
3.2.4.3. Additivazione chimica.....	»	86
3.2.4.3.1. Antincrostante	»	86
3.2.4.3.2. Antischiuma	»	87
3.2.4.3.3. Deossigenante (<i>oxygen scavenger</i>)	»	87
3.2.4.3.4. Inibitore di corrosione	»	87
3.2.4.4. Pulizia in continuo con palline (<i>ball cleaning system</i>)	»	88
3.2.4.5. <i>Skid</i> di lavaggio acido	»	89
3.2.5. Tecnologia LTF (<i>low temperature flash</i>)	»	90
3.2.5.1. Impianto ENEL di Piombino	»	90
3.2.5.2. Risultati e vantaggi	»	93
3.3. Processi a membrane	»	94
3.3.1. Osmosi inversa	»	95
3.3.1.1. Pretrattamento	»	95
3.3.1.1.1. Biocida	»	96
3.3.1.1.2. Chiarificazione o filtrazione preliminare	»	96
3.3.1.1.3. Disoleazione.....	»	97
3.3.1.1.4. Filtrazione meccanica	»	98
3.3.1.1.4.1. Filtri a sabbia	»	99
3.3.1.1.4.2. Filtri dual media	»	100
3.3.1.1.5. Declorazione	»	101
3.3.1.1.6. Deferrizzazione	»	101
3.3.1.1.7. Correzione del pH	»	102
3.3.1.1.8. Filtrazione fine	»	102
3.3.1.2. Pompe ad alta pressione	»	103
3.3.1.3. Membrana	»	104

3.3.1.3.1. Materiali	»	106
3.3.1.3.2. Tipi di costruzione	»	107
3.3.1.3.3. Lavaggio chimico	»	108
3.3.1.3.4. Sanitarizzazione	»	109
3.3.1.4. Recuperatori di energia	»	109
3.3.2. Nanofiltrazione	»	110
3.3.3. Elettrodialisi (ED o anche EDY)	»	111
3.3.4. Decarbonatazione	»	112
3.4. Altre tecnologie	»	113
3.5. Impianti ibridi	»	114
3.6. Evaporazione attraverso membrane	»	116

4 Energie alternative e rinnovabili

4.1. Introduzione	»	119
4.2. Dissalazione solare	»	119
4.2.1. Dissalatori atmosferici senza recupero di energia	»	120
4.2.2. Dissalatori atmosferici con recupero di energia	»	122
4.2.3. Dissalatore sotto vuoto senza recupero di energia	»	123
4.2.4. Dissalatori sotto vuoto con recupero di energia	»	125
4.2.5. Applicabilità all'osmosi inversa	»	126
4.3. Dissalazione eolica	»	126
4.4. Recuperi energetici	»	128
4.5. Altre energie rinnovabili	»	128

5 Presa e rigetto dell'acqua di mare

5.1. Introduzione	»	129
5.2. Presa dell'acqua di mare	»	129
5.2.1. Bocca di aspirazione	»	131
5.2.2. Tubo di adduzione	»	132
5.2.3. Vasca di calma	»	133
5.3. Rigetto e smaltimento degli effluenti	»	134
5.3.1. Incremento della salinità	»	135
5.3.2. Inquinamento termico	»	135
5.3.3. Inquinamento chimico	»	136
5.3.4. Sfruttamento della salamoia	»	136
5.3.4.1. Stagni solari (<i>solar pond</i>)	»	137
5.3.4.2. Saline	»	138
5.3.4.3. Altre tecniche di sfruttamento della salamoia	»	139

6 Trattamenti dell'acqua dissalata

6.1. Introduzione	»	141
6.2. Demineralizzazione	»	142
6.2.1. Letti misti	»	142
6.2.2. EDI (<i>elettrodeionizzazione</i>)	»	145

6.3. Potabilizzazione	»	148
6.3.1. Normative	»	148
6.3.2. Sistemi industriali di potabilizzazione	»	150
6.3.2.1. Dosaggio chimico	»	151
6.3.2.2. Dosaggio di calce	»	152
6.3.2.3. Filtrazione su letti di carbonato di calcio	»	152
6.3.2.4. Disinfezione	»	154
6.3.2.5. Altri dosaggi	»	156

7 Considerazioni economiche

7.1. Introduzione	»	157
7.2. Investimento	»	157
7.3. Esercizio	»	159
7.3.1. Personale	»	160
7.3.2. Additivi	»	160
7.3.3. Emergenze	»	161
7.4. Manutenzione	»	161
7.4.1. Impianti evaporativi	»	161
7.4.2. Impianti a membrana	»	162
7.5. Conservazione	»	162
7.5.1. Impianti evaporativi	»	163
7.5.2. Impianti a membrana	»	163

8 Criteri di scelta dell'impianto

8.1. Introduzione	»	165
8.2. Criteri di scelta della tecnologia	»	165
8.3. Scelta del fornitore	»	168
8.3.1. Dissalazione evaporativa	»	168
8.3.2. Dissalatori a osmosi inversa	»	171
8.3.2.1. Affidabilità tecnica e finanziaria	»	171
8.3.2.2. Logistica	»	172
8.4. Selezione dei materiali e dei componenti	»	172
8.4.1. Dissalatori evaporativi	»	173
8.4.2. Dissalatori a osmosi inversa	»	173
8.5. Ubicazione dell'impianto	»	174
8.5.1. Dissalatori evaporativi	»	174
8.5.2. Dissalatori a osmosi inversa	»	175
8.6. Fattore di utilizzo	»	176
8.6.1. Richiesta di acqua dissalata	»	176
8.6.2. Convenienza nell'approvvigionamento dell'energia	»	177
8.7. Efficienza energetica	»	177
8.7.1. Impianti a osmosi inversa	»	177
8.7.2. Impianti evaporativi MED e MED/TVC	»	178

Riferimenti bibliografici	»	180
--	----------	------------

Prefazione

Questo libro riassume tutte le conoscenze tecniche di carattere generale relative alla dissalazione e disponibili alla data. I dati riportati si riferiscono allo stato dell'arte consolidato nel primo decennio del nuovo millennio, ma i principi generali del processo rimarranno comunque validi per molto tempo. Alcuni dati economici potranno invece venire superati dall'evolversi della situazione economica, dalle disponibilità energetiche future e dai ritrovati scientifici prodotti dagli sforzi delle ricerche attualmente in corso.

Il presente lavoro non intende configurarsi come un manuale dettagliato di progettazione di impianti di dissalazione, ma intende fornire le basi tecniche al progettista e i criteri di valutazione all'investitore, per consentire un dialogo efficace fra i due soggetti sulla base della comprensione dei fenomeni e delle conoscenze comuni. Per raggiungere tale scopo, i concetti tecnici generali e i problemi relativi ai criteri di valutazione vengono trattati in modo completo ed esaustivo. Lo stato dell'arte, i problemi tecnologici e i trattamenti a monte e a valle dei processi di dissalazione sono esaminati con cura; quindi il progettista può trovare tutte le informazioni teoriche e pratiche che sono alla base di una corretta definizione di un progetto completo di dissalazione. Ciò può anche stimolare l'approfondimento dei parametri necessari al corretto dimensionamento degli impianti, grazie anche all'esame dettagliato di quanto finora realizzato e funzionante con successo. Il testo è suddiviso in otto capitoli, che possono essere descritti sinteticamente nel seguente modo:

- capitolo 1: si tratta di un capitolo introduttivo e propedeutico alla trattazione vera e propria;
- capitolo 2: vengono attentamente analizzate tutte le proprietà chimiche e fisiche dell'acqua di mare e i fenomeni di erosione, corrosione e incrostazione;
- capitolo 3: si occupa delle principali tecnologie applicabili alla dissalazione;
- capitolo 4: include un'analisi delle energie alternative utilizzabili per la dissalazione;
- capitolo 5: esamina la presa e il rigetto dell'acqua di mare;
- capitolo 6: vengono elencati dettagliatamente tutti i trattamenti a cui sottoporre l'acqua dissalata;
- capitolo 7: prende in considerazione i costi e gli investimenti legati alla creazione di un impianto di dissalazione;
- capitolo 8: descrive quali sono i migliori criteri di scelta dell'impianto.

1 DISSALAZIONE DELL'ACQUA DI MARE

1.1. INTRODUZIONE

La dissalazione dell'acqua di mare ha avuto un rapido sviluppo negli ultimi decenni e lo stato dell'arte si è rapidamente evoluto delineando tecnologie e convenienze ben determinate. Il presente lavoro intende fare il punto sullo stato dell'arte attuale, confrontando le diverse tecnologie e delineandone la convenienza a seconda dei vari fattori ambientali e industriali da cui la scelta dell'investimento è influenzata.

Lo sviluppo della dissalazione prosegue con ritmo crescente e si moltiplica il numero degli investitori. La tecnologia rimane però un patrimonio legato a un limitato numero di tecnologi esperti, a causa delle difficoltà tecniche e della relativa elevata barriera di accesso. I tecnologi della dissalazione (processisti, produttori di componenti specializzati, consulenti, ecc.) fanno parte di un mondo ancora chiuso, anche se perfettamente noto e controllato, in cui sono disponibili informazioni scientifiche e *database* aggiornati e completi. Esistono ad esempio elenchi completi di tutti gli impianti esistenti al mondo che riportano anche i principali dati di ciascun impianto: l'anno di realizzazione, la capacità, il fornitore e lo stato aggiornato dell'esercizio. Gli impianti di capacità superiore ai 100 m³/g sono ormai oltre 20.000 nel mondo e l'esistenza di tali *database* e delle statistiche a essi riconducibili danno un'idea di quanto il mondo della dissalazione sia monitorato e tenuto sotto attento controllo.

1.2. PERCHÉ DISSALARE

La dissalazione dell'acqua di mare è un processo difficile e costoso. Tuttavia esso è indispensabile, perché la richiesta di acqua dolce totale cresce con una velocità superiore alla capacità di sfruttare l'acqua dolce disponibile in natura e perché la richiesta supera in molte aree del pianeta perfino la disponibilità massima teorica di acqua dolce naturale. Il benessere delle persone, la crescita industriale e lo sviluppo dell'agricoltura richiedono quindi un'integrazione dell'acqua dolce disponibile.

1.2.1. Disponibilità di acqua dolce

La disponibilità di acqua dolce del pianeta è complessivamente scarsa. Il 97% dell'acqua totale è salata e il rimanente 3% è per lo più sotto forma di ghiacci. Soltanto lo 0,4% è disponibile come acqua superficiale dolce o di falda (facilmente potabilizzabile) e partecipa all'equilibrio dinamico del ciclo naturale descritto nel paragrafo 1.4. È stato calcolato che l'11% della popolazione mondiale consuma l'88% dell'acqua dolce disponibile. Poiché l'acqua non è un bene facilmente accaparrabile, si può dedurre facilmente come i paesi ricchi siano diventati tali proprio grazie all'abbondante disponibilità di acqua. Ciò conferma l'importanza che l'acqua ha avuto e avrà per lo sviluppo equilibrato della popolazione del pianeta. La necessità di approvvigionare acqua dolce non può che rivolgersi quindi alla dissalazione dell'acqua di mare, laddove specifiche condizioni locali non rendano accessibili altre fonti.

Sistemi alternativi alla dissalazione, come il trasporto degli iceberg fino alle zone di utilizzo per successivo scioglimento o lo sfruttamento dei giacimenti sotterranei di acqua fossile, sono stati studiati e anche applicati ove possibile.

Il mare invece rappresenta una fonte inesauribile di acqua dissalabile e facilmente disponibile in ogni parte del pianeta.

1.2.2. Popolazione mondiale

La popolazione mondiale è in aumento, soprattutto nelle zone geografiche più aride e con un fabbisogno di acqua più accentuato. In Italia la popolazione è stabile da molti anni, sia per numero di abitanti sia per distribuzione geografica. In altre parti del mondo la popolazione raddoppia a ogni generazione: in Iran, per esempio, la popolazione negli ultimi 30 anni è passata da 36 milioni a 80 milioni e il problema dell'acqua, una volta sostenibile, ora si sente in modo drammatico, in particolare nel sud del paese.

La popolazione che si affaccia a sud sul Mediterraneo è oggi pari a 170 milioni e ha già gravi problemi di carenza di acqua. Tale popolazione si prevede che supererà i 250 milioni fra solo 10 anni, quindi gli ulteriori 80 milioni non avranno nuove fonti di acqua da sfruttare, in quanto tutte le possibili fonti attuali sono già sfruttate al massimo per le esigenze attuali.

1.2.3. Fabbisogno pro capite

Il fabbisogno di acqua pro capite è in costante aumento con la crescita del tenore medio di vita degli abitanti del pianeta. Il limite di sopravvivenza è di circa 10 litri al giorno pro capite, ma l'aspettativa è quella di una vita dignitosa e confortevole. Tale aspettativa ovviamente richiede ingenti quantitativi di acqua per uso

personale e anche per sostenere l'agricoltura e l'industria. L'ONU ha indicato la disponibilità di 40 litri giornalieri pro capite come diritto minimo dell'uomo. Da parte sua l'UNESCO ha verificato che il quantitativo di 10 m³/anno di acqua potabile pro capite è in effetti disponibile solo per la metà della popolazione del pianeta.

In molti paesi in via di sviluppo si consuma acqua di qualità inaccettabile, con contenuti di sali fino a oltre 3000 ppm, misura questa molto superiore alla qualità organolettica ammissibile e ai limiti imposti o suggeriti dalle organizzazioni internazionali e dalle leggi nazionali. Il necessario incremento qualitativo configura quindi un'ulteriore esigenza da sommare alla attuale scarsa disponibilità.

Nei paesi industrializzati il consumo individuale è molto superiore alla media e nel nord dell'America supera i 400 litri pro capite al giorno distribuito alle famiglie. Negli USA il consumo medio pro capite, inclusa la quota parte di consumo agricolo e industriale, supera i 6500 litri al giorno.

In Italia il fabbisogno pro capite giornaliero è aumentato negli ultimi venti anni da 200 a quasi 300 litri al giorno, ma supera i 1500 litri al giorno quando si attribuisce a ogni abitante anche il consumo agricolo e industriale. La qualità dell'acqua potabile in Italia è comunque mediamente molto buona e spesso eccellente. La situazione italiana in dettaglio è la seguente, riferita alla totalità di acqua dolce canalizzata (trattata e non, ma comunque presa, convogliata e tariffata):

- il 48% dell'acqua dolce è utilizzato in agricoltura;
- il 19% dell'acqua dolce è utilizzato nell'industria di vario genere (esclusa l'energia);
- il 14% dell'acqua dolce è demineralizzata e utilizzata nella generazione di energia;
- il 19% dell'acqua dolce è distribuita alle famiglie come acqua potabile.

Le famiglie in Italia consumano anche acque minerali imbottigliate per ulteriori 10,2 milioni di m³/anno, pari a quasi mezzo litro a testa al giorno.

Complessivamente la situazione media italiana della disponibilità non è fra le più preoccupanti, nonostante gli elevati consumi pro capite. A fronte del fabbisogno totale pro capite giornaliero di 1500 litri, la disponibilità attuale è di 2700 litri. Tale disponibilità tuttavia è in diminuzione e si prevede una sua discesa fino a 2000 litri nei prossimi anni; inoltre non è uniforme geograficamente e problemi di scarsa disponibilità sono comunque già presenti in alcune zone aride del paese, valutate in circa il 30% della superficie dell'Italia e concentrate soprattutto nelle regioni meridionali.

La piovosità media annua in Italia, seppure molto variabile di anno in anno, è stata statisticamente misurata in 765 mm. Le regioni del nord superano ampiamente la media, con una piovosità annua di oltre 900 mm, mentre alcune regioni del sud non superano i 600 mm (ultima è la Sardegna con appena 500 mm).

La piovosità media è un indice significativo di disponibilità di acqua dolce naturale, ma l'utilizzo diretto dell'acqua piovana è spesso difficile per mancanza di invasi di raccolta e per il regime incostante e spesso torrentizio con cui i fenomeni piovosi si realizzano.

1.2.4. Variazioni climatiche

Le variazioni climatiche sono difficilmente prevedibili, ma, secondo un'opinione diffusa fra gli esperti di meteorologia, in alcune parti del pianeta le variazioni climatiche saranno consistenti e gli equilibri idrici del passato potranno modificarsi e risultare non più idonei al fabbisogno della popolazione. In particolare molti ritengono che il sud dell'Italia sia destinato a un progressivo inaridimento. Solo in parte si potrà contrastare il naturale inaridimento con un più efficace sfruttamento delle risorse naturali e quindi il ricorso alla dissalazione dell'acqua del mare diventerà presto indispensabile.

Recenti rilevazioni hanno misurato la quantità di territorio in corso di inaridimento. Nei soli paesi del sud del Mediterraneo, cioè in Libia, Tunisia e Marocco, si perdono oltre 3000 km² all'anno di terreni coltivabili. I flussi migratori causati da questi fenomeni climatici non potranno essere contenuti, se non anche attraverso la ricostituzione di condizioni di vivibilità accettabili. La dissalazione dell'acqua di mare è forse la componente principale per la ricostituzione di queste condizioni.

La Libia, che è fra i paesi dell'area quello dotato di maggiori risorse finanziarie, ha recentemente annunciato un programma ambizioso di dissalazione che prevede 2.000.000 m³/g di nuova produzione nei prossimi anni, di cui 500.000 concentrati nella città di Tripoli.

1.2.5. Uso industriale

L'industria è uno dei principali consumatori di acqua sia per il processo produttivo sia per il raffreddamento dei macchinari. Spesso l'industria compete con gli utilizzi civili e potabili dell'acqua di falda e contribuisce a impoverire le fonti di approvvigionamento.

L'entità del problema risulta evidente se si considera ad esempio una moderna centrale termoelettrica a ciclo combinato da 1000 MW con rendimento del 55%. Il 45% dell'energia, pari a oltre 800 MW, sarà quindi disperso nell'ambiente attraverso i fumi e soprattutto attraverso il raffreddamento dei condensatori di turbina. Quando tale servizio è realizzato con torri di raffreddamento a umido, il vapore disperso assomma mediamente a oltre 500 t/h. Il consumo di acqua è

quindi enorme, pari al fabbisogno individuale medio di oltre 50.000 abitanti, solo per alimentare il ciclo ausiliario delle torri di raffreddamento.

La soluzione prospettata è che l'industria in generale si renda autonoma nei consumi di acqua, dotandosi di dissalatori propri, almeno quando l'ubicazione industriale è in prossimità del mare.

L'industria è in genere più attrezzata economicamente per ammortizzare il costo degli impianti di dissalazione e in ogni caso alcuni trattamenti sono comunque necessari per portare l'acqua dolce alle condizioni richieste per l'utilizzo. L'acqua industriale deve, infatti, rispondere a caratteristiche di purezza chimica in genere superiori a quelle dell'acqua potabile. La dissalazione quindi comporterebbe solo un costo aggiuntivo a quello che comunque deve essere preventivato per la produzione di acqua molto pura.

Tipico è il caso italiano dell'area industrializzata di Priolo-Augusta in Sicilia, dove i complessi petrolchimici e le centrali termoelettriche emungono acqua dolce dai pozzi in quantitativi tali da causare infiltrazioni di acqua di mare nelle falde, e da rendere l'acqua di falda salmastra e di non più immediata potabilizzazione.

Questo problema non è solo italiano. Emblematico è il caso indiano dell'acciaiera di Vizag, sulla costa sudorientale dell'India. L'acciaiera consuma oltre 700 tonnellate all'ora di acqua emunta dai pozzi (consumo pari a quello di 200.000 abitanti, secondo gli attuali standard di consumo locali) e spende circa 2 € alla tonnellata per purificare ulteriormente quest'acqua nella misura necessaria al proprio uso. La popolazione locale non ha più acqua sufficiente per i propri consumi e la municipalizzata sta progettando un dissalatore civile che produrrà acqua potabile al costo di circa 1 € alla tonnellata. Se l'acciaiera si dotasse di un dissalatore, potrebbe produrre acqua di processo per il proprio impianto al costo di circa 1,5 € alla tonnellata (risparmiando 0,5 € alla tonnellata) e lasciare la disponibilità dell'acqua di falda alla popolazione, evitando alla municipalizzata la spesa di 1 € alla tonnellata.

A volte la soluzione più conveniente non è attuata per carenza di coordinamento fra gli enti locali e le attività industriali, ma la razionalizzazione degli utilizzi potrà portare a risparmi consistenti in futuro.

1.2.6. Uso agricolo

Nei secoli passati l'agricoltura era specializzata in quelle produzioni compatibili con la piovosità e la disponibilità naturale di acqua superficiale. Le esigenze produttive attuali hanno reso conveniente la produzione di ortaggi che richiedono quantitativi di acqua non compatibili con le condizioni climatiche e in competizione con il fabbisogno individuale della popolazione e delle industrie.

La convivenza di queste diverse esigenze è spesso difficile e richiede interventi

amministrativi. Tipico è il caso italiano di Simeri Crichi in Calabria, dove la nuova centrale termoelettrica dell'Edison è entrata in esercizio nel 2003, emungendo oltre 500 tonnellate all'ora di acqua dalla falda per la condensazione del vapore di turbina, sottraendola alla disponibilità agricola. Queste 500 tonnellate orarie non sono recuperabili giacché disperse nell'atmosfera sotto forma di vapore dalle torri di raffreddamento. La regione ha comunque autorizzato la realizzazione della centrale a fronte dell'impegno dell'Edison a costruire e gestire a proprie spese un impianto di dissalazione che fornisca all'agricoltura lo stesso quantitativo di acqua consumato dalla centrale. Inoltre è stato preteso il rispetto del bilancio dei sali oltre a quello dell'acqua: essendo l'acqua dispersa in atmosfera priva di sali (vapore dalle torri), è stata imposta una particolare purezza per l'acqua dissalata, in modo che la restituzione avvenisse in modo congruente anche rispetto alla purezza. La Edison ha quindi realizzato due unità di dissalazione da 250 t/h ciascuna per uso agricolo, del tipo MED/TVC, alimentate con vapore di spillamento dalle turbine. Nel caso specifico, la Edison ha realizzato anche un impianto più piccolo del tipo MVC da 10 t/h per il proprio consumo di processo, come richiesto per il reintegro dell'acqua di ciclo in alimento alle caldaie.

Oltre a quanto è stato già osservato, l'aumentato utilizzo di fertilizzanti azotati (specialmente nitrati) provoca un progressivo inquinamento delle falde, da cui tradizionalmente si emungeva acqua potabile. L'acqua potabile diventa sempre più scarsa e i pozzi devono diventare più profondi per intercettare falde non inquinate. Tipico è il caso di alcune nuove centrali termoelettriche nelle Marche (siti di Jesi e di Bussi), dove l'acqua emungibile dalle falde per uso industriale ha caratteristiche di inquinamento agricolo tali che, dopo il prelievo, non sarebbe più nemmeno utilizzabile. In effetti, dopo l'emungimento, quest'acqua non sarebbe nemmeno idonea allo spargimento sul terreno o alla reiniezione in falda. Il contenuto di nitrati supera, infatti, il limite di legge per ogni tipo di smaltimento naturale. Anche l'uso agricolo quindi in certi casi entra in competizione con l'uso potabile nel dividere le scarse risorse idriche disponibili.

Dove possibile, la dissalazione può contribuire ad aumentare le risorse idriche totali e quindi a diminuire i danni provocati dalla competizione triangolare fra uso potabile, industriale e agricolo. Molto però si può ancora fare per razionalizzare sia il consumo di fertilizzanti (preservando la qualità dell'acqua di falda) sia i quantitativi totali di acqua consumati in agricoltura (contribuendo al mantenimento dell'equilibrio idrico totale). Attualmente in Italia si consumano circa 5700 m³/anno per ettaro coltivato, cioè molto di più della media europea. Qualora si risparmiasse il 20% di tale consumo, l'acqua dolce risparmiata potrebbe coprire il 50% del fabbisogno totale delle famiglie.

Il riutilizzo dell'acqua reflua in agricoltura, dopo idoneo trattamento di depurazione, potrebbe contribuire alla diminuzione dei consumi agricoli di acqua primaria (§ 1.2.7).

1.2.7. Reti idriche e usi differenziati

Essendo l'acqua dissalata la più costosa fra le acque potabili (o facilmente potabilizzabili), il suo uso dovrebbe essere limitato all'integrazione di sistemi idrici alimentati anche da altre fonti, quali pozzi o invasi di raccolta dell'acqua piovana e superficiale.

L'industria dovrebbe aiutare le reti idriche potabili, evitando il prelievo e realizzando invece sistemi di dissalatori autonomi. L'agricoltura dovrebbe attingere acqua anche dai sistemi di depurazione degli scarichi civili, mediante reti separate da quelle potabili, e limitare il prelievo delle acque di falda e superficiali (pulite e facilmente potabilizzabili) e in ultima analisi anche la necessità del reintegro idrico dalla dissalazione.

La riprogettazione dei sistemi di reti idriche diventerà presto una necessità non solo per limitare le perdite (che oggi sembrano imponenti a causa della scarsa manutenzione e del cattivo stato delle condotte), ma anche e soprattutto per distribuire in modo differenziato l'acqua con diverse caratteristiche a seconda del servizio:

- acqua prevalentemente dissalata agli utenti industriali;
- acqua eventualmente integrata dai dissalatori agli utenti civili;
- acqua riciclata (depurata) all'agricoltura.

In alcuni paesi caratterizzati da particolare scarsità di acqua, la distribuzione differenziata avviene già ora. A Singapore e in Qatar le municipalizzate distribuiscono, oltre all'acqua potabile, anche acqua distillata ai consorzi industriali, evitando così che ogni industria debba dotarsi di piccoli dissalatori individuali e realizzando risparmi di scala che ne diminuiscono il costo. L'acqua recuperata dai depuratori viene quindi distribuita per l'irrigazione agli agricoltori, i quali non devono quindi attingere alle reti di acqua potabile. Le tariffe poi vengono differenziate non solo secondo i costi di produzione, ma anche ripartite in base a criteri di sostenibilità economica.

1.2.8. Scarico zero

Nell'industria si sta diffondendo lentamente il concetto di zero scarico idrico, cioè il totale riutilizzo dell'acqua di scarico per non gravare in modo improprio sui depuratori civili e per evitare il rischio di impoverire o inquinare le falde. Questi sistemi sono particolarmente costosi e quindi non sempre facilmente applicabili. La concentrazione dei reflui fino alla separazione dei sali per sovrassaturazione, infatti, genera salamoie di elevata corrosività chimica, che richiedono materiali di costruzione particolarmente costosi. Le tecnologie applicabili per la scelta dei materiali e per la movimentazione dei fanghi in progressivo ispessimento sono tuttora in fase sperimentale e quindi comportano costi particolarmente elevati. ENEL ha avviato un programma parziale di scarico zero su alcune delle proprie cen-

trali termoelettriche in Italia, assumendosi l'onere di apripista tecnologico. In questi impianti vengono trattati gli scarichi degli impianti di demineralizzazione con resine a scambio ionico e i reflui provenienti dagli impianti di desolfurazione dei fumi. Si tratta di scarichi con carico salino elevato, di difficile smaltimento, e riguardano portate di acqua elevate, tanto da rendere il recupero interessante anche dal punto di vista del bilancio dell'acqua e non solo della protezione ambientale. Qualora questi sistemi potessero diffondersi, il sistema idrogeologico ne risulterebbe avvantaggiato e quindi anche il fabbisogno di reintegro tramite dissalazione ne risulterebbe convenientemente diminuito.

1.2.9. Fonti alternative di acqua dolce

Qualora disponibili, altre fonti alternative di acqua dolce meritano di essere valutate prima di avviare un programma di dissalazione. È quindi opportuno valutare la necessità della dissalazione come un contributo alla disponibilità totale ottenuta da molteplici fonti. Vale la pena di menzionare due esempi di fonti alternative di acqua dolce, caratteristiche ognuna della specificità del territorio in cui si trovano:

- in Italia, nella zona del Sulcis, le vecchie miniere di carbone (oggi in disuso) si sono lentamente riempite di acqua percolata dal mare in profondità attraverso gli strati di carbone fossile. La profondità delle miniere (superiore alla pressione osmotica) e l'effetto purificante del carbone hanno dissalato e purificato l'acqua, che è ora di ottima qualità e disponibile all'estrazione tramite semplice pompaggio;
- in Libia è stato scoperto da anni un importante giacimento minerale sotterraneo di acqua dolce di buona qualità. Le opere di pompaggio e di convogliamento di quest'acqua dal sud del paese verso le zone più densamente popolate sono ora in fase di ultimazione (*Great man-made river*) e già ora 2 milioni di m³ al giorno sono disponibili alla distribuzione. Si tratta di un imponente sistema di opere idrauliche che certamente alleggerisce il fabbisogno di dissalatori del paese. Alla fine del progetto il 75% del fabbisogno di acqua dell'intero paese sarà soddisfatto dalla portata programmata di 6 milioni di m³ al giorno.

Gli esperimenti effettuati sul recupero dell'acqua dai ghiacci, trasportando gli iceberg, non hanno fino ad ora dato risultati promettenti. Si tratta però di un sistema alternativo alla dissalazione e va considerato come un possibile contributo al raggiungimento dell'equilibrio idrico.

1.2.10. Scenari futuri

La dissalazione sarà limitata ai fabbisogni industriali e alla effettiva necessità di

integrazione dei sistemi di acqua potabile dopo che le altre fonti di acqua dolce saranno preservate e sfruttate al meglio.

In alcune zone geografiche, dove l'aumento demografico è maggiore e dove l'aridità non consente importanti sviluppi di altre forme di raccolta di acqua dolce, la necessità di integrazione di acqua potabile è più marcata (per esempio in Medio Oriente e nel nord dell'Africa). Anche alcune aree del sud dell'Italia potrebbero rientrare fra questi casi, specialmente a seguito delle variazioni climatiche in corso e della possibile desertificazione progressiva.

La necessità di integrazione è comunque una realtà in molte parti del pianeta e la fonte di acqua naturale e abbondante a cui attingere non può che essere il mare. L'utilizzo sistematico della dissalazione richiederà un grande sforzo di programmazione da parte delle istituzioni mondiali e un impiego massiccio di capitali e di energia. È quindi prevedibile che la programmazione della disponibilità di acqua diventi parte di una sola programmazione combinata di acqua ed elettricità ed è quindi probabile che l'acqua dissalata venga prodotta laddove si produce energia e resa disponibile attraverso reti idriche di distribuzione. Queste reti idriche saranno alimentate da fonti diverse e in esse la dissalazione avrà un peso variabile a seconda delle condizioni climatiche e ambientali.

Il business della dissalazione vale oggi circa 5 miliardi di euro spesi nel mondo ogni anno per la realizzazione di nuovi impianti e si prevede che questa cifra possa triplicare o addirittura quadruplicare nel prossimo decennio. I nuovi impianti richiedono ogni anno una potenza energetica aggiuntiva di 2000-3000 MW per la loro alimentazione e questo dato potrà triplicarsi nel prossimo decennio parallelamente all'aumento previsto dei nuovi impianti.

Alcuni istituti internazionali hanno elaborato proiezioni sullo sviluppo futuro della dissalazione e pubblicato proiezioni di crescita nei 10 maggiori mercati. La tabella 1.1 è stata pubblicata dal *Water Desalination Report* nel giugno 2009 ed è relativa alla totalità degli impianti di dissalazione dedicati sia all'acqua di mare sia all'acqua salmastra. Si valuta che circa il 35%-40% dei nuovi impianti previ-

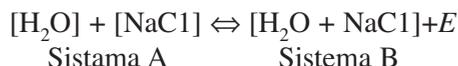
Tabella 1.1. Previsione di nuovi impianti di dissalazione nei principali mercati di destinazione

Paesi	2009-13 (m ³ /g)			2013-16 (m ³ /g)		
	Osmosi Inversa	Evaporazione	Totale	Osmosi Inversa	Evaporazione	Totale
Arabia Saudita	1.850.000	2.350.000	4.200.000	2.350.000	3.050.000	5.400.000
Emirati Arabi	1.100.000	1.400.000	2.500.000	2.200.000	2.800.000	5.000.000
USA	2.100.000	0	2.100.000	3.100.000	0	3.100.000
Cina	1.600.000	400.000	2.000.000	2.000.000	500.000	2.500.000
Libia	290.000	810.000	1.100.000	550.000	1.450.000	2.000.000
Australia	950.000	50.000	1.000.000	1.950.000	50.000	2.000.000
Kuwait	270.000	680.000	950.000	550.000	1.450.000	2.000.000
Israele	1.350.000	1.400.000	700.000	1.500.000	0	1.500.000
Algeria	800.000	200.000	1.000.000	1.400.000	200.000	1.600.000
Spagna	780.000	20.000	800.000	1.400.000	0	1.400.000
Totale	11.090.000	7.310.000	16.350.000	17.000.000	9.500.000	26.500.000

sti saranno dedicati all'acqua salmastra in quelle località dove essa è disponibile in abbondanza (USA, Spagna, Israele). Gli impianti ad acqua salmastra saranno in genere a osmosi inversa, mentre la restante parte sarà probabilmente equamente distribuita fra impianti a osmosi inversa o a evaporazione, a seconda delle convenienze locali specifiche.

1.3. TERMODINAMICA DELLA DISSALAZIONE

Passare da un sistema a più alto contenuto di entropia (acqua contenente sali disciolti) a un sistema di più bassa entropia (acqua dolce e sali separati) richiede del lavoro, la cui entità dipende unicamente dallo stato del sistema iniziale e da quello del sistema finale, indipendentemente dalla tecnologia scelta per la trasformazione:



dove E corrisponde a:

- calore di dissoluzione;
- pressione osmotica;
- gradiente ebullioscopico.

La tecnologia ed eventualmente l'efficienza meccanica dei componenti utilizzati nell'impianto determinerà la quantità di consumi ausiliari, ma l'energia primaria necessaria alla trasformazione è indipendente dalle scelte impiantistiche. Ciò consente di affermare che la dissalazione è comunque un processo energeticamente costoso, come si può dedurre dal secondo principio della termodinamica. La dissoluzione di sali in acqua dolce è un processo esotermico e il calore liberato può essere misurato come aumento della temperatura della soluzione. La quantità di calore dipende principalmente dalla natura chimica dei sali ed è direttamente proporzionale dalla loro concentrazione. In misura minore essa dipende dalle condizioni operative, come la temperatura a cui avviene la dissoluzione. Supponendo di voler realizzare in laboratorio un campione di acqua di mare a temperatura ambiente partendo da acqua dolce e da una miscela di sali, si rileva un aumento di temperatura del campione di circa 0,64 °C, corrispondenti a circa 0,75 kWh/m³. L'equazione chimica si può quindi scrivere come segue:

$$\text{acqua dolce} + \text{sali} = \text{acqua di mare} + 0,75 \text{ kWh/m}^3$$

Per acqua di mare a temperatura ambiente e salinità pari a 40.000 ppm, l'energia totale necessaria per dissalare è data da:

$$E + E_c$$

dove

$E = 0,75 \text{ kWh/m}^3$ (per differenza entropica)

E_c = energia spesa per inefficienza tecnologica.

La dissalazione di 1 m^3 di acqua non può quindi essere ottenuta se non spendendo almeno $0,75 \text{ kWh}$ oltre l'energia ausiliaria richiesta dalla specifica tecnologia per vincere le perdite di carico o assicurare le differenze di temperatura necessarie allo scambio termico, quindi per realizzare il processo con velocità industrialmente accettabile. Vi sono due tipi principali di impianti:

- evaporativi
- a osmosi inversa.

IMPIANTO EVAPORATIVO

Il gradiente ebullioscopico dell'acqua di mare alla temperatura ambiente è di circa $0,64 \text{ }^\circ\text{C}$ e quindi è necessario fornire all'acqua di mare $0,75 \text{ kWh/m}^3$ prima che l'evaporazione possa avvenire alla stessa pressione a cui avverrà la successiva condensazione. L'acqua di mare a pressione atmosferica bolle a $100,64 \text{ }^\circ\text{C}$, ma genera vapore puro che condenserà alla temperatura di $100 \text{ }^\circ\text{C}$. L'evaporato è quindi surriscaldato tanto quanto è il gradiente ebullioscopico dell'acqua di mare in evaporazione. Inoltre è normale prassi industriale riscaldare l'acqua di mare di ulteriori $2\text{-}3 \text{ }^\circ\text{C}$ al fine di limitare l'estensione delle superfici di scambio termico in fase di condensazione.

IMPIANTO A OSMOSI INVERSA

La pressione osmotica dell'acqua di mare è di circa 28 bar . Prima che il permeato attraversi la membrana osmotica, è necessario pareggiarne la pressione, spendendo $0,75 \text{ kWh/m}^3$. Solo comprimendo l'acqua di mare oltre questa pressione si ottiene un flusso di acqua dissalata tanto più rapido quanto maggiore è l'energia fornita per vincere anche le perdite di carico attraverso le membrane. È normale prassi industriale comprimere l'acqua di mare fino a $65\text{-}70 \text{ bar}$ e ottenere una velocità di produzione industrialmente interessante.

Altri processi di dissalazione, non approfonditi in questa sede a causa del modesto interesse industriale, avranno sempre lo stesso vincolo di $0,75 \text{ kWh/m}^3$ da spendere prima che il processo possa poi procedere a velocità industriale. Mentre il sovrappiù di energia può essere ottimizzato e in certi casi recuperato con adeguate soluzioni impiantistiche, la differenza di contenuto energetico dell'acqua dolce rispetto all'acqua di mare non è recuperabile in alcun modo.

Questa equivalenza di energia consente ad esempio di calcolare con precisione la pressione osmotica di una qualsiasi soluzione di sali in acqua, semplicemente

misurandone il gradiente ebullioscopico in laboratorio o misurandone il riscaldamento per dissoluzione durante la formazione del campione.

Il calore di dissoluzione dei sali, uguale al gradiente ebullioscopico e anche all'energia potenziale corrispondente alla pressione osmotica, varia al variare della salinità dell'acqua di mare in modo lineare e varia anche in funzione della temperatura: quanto maggiore è la temperatura a cui si opera, tanto maggiore è l'energia in gioco, sia che si tratti di impianti a osmosi inversa o evaporativi.

Nel caso dell'osmosi inversa, la conduzione dell'impianto a temperatura ambiente favorisce il processo, in quanto la pressione osmotica è più bassa alle basse temperature. È peraltro anche vero che un moderato aumento di temperatura riduce la viscosità dell'acqua e quindi riduce le perdite di carico, consentendo di risparmiare più energia di quanta se ne deve spendere per vincere l'accresciuta pressione osmotica (fino a circa il 10% di risparmio complessivo, passando da 20 °C a 30 °C).

Nel caso dell'evaporazione, la conduzione dell'impianto a più alte temperature (65 °C per il MED e oltre 100 °C per l'MSF) sfavorisce il processo dal punto di vista del contenuto energetico del prodotto, ma consente di realizzare soluzioni impiantistiche con recuperi di calore più spinti e quindi risulta complessivamente più conveniente.

Le tecniche messe a punto per recuperare l'energia ausiliaria spesa per la filtrazione dell'acqua attraverso le membrane osmotiche consentono ora di limitare i consumi totali di un impianto a osmosi inversa fino a meno di 3 kWh/m³. Si tratta però di energia elettrica che alimenta le elettropompe ad alta pressione e quindi prodotta da centrali elettriche con un rendimento ben inferiore al 100% (circa 35% per i vecchi cicli a vapore e oltre 55% per i nuovi cicli combinati). Il rendimento della produzione elettrica è un elemento fondamentale per il paragone con i consumi termici.

L'elevato costo dei materiali da impiegare negli impianti evaporativi, costringe ad installare superfici di scambio termico ragionevolmente limitate, tali per cui il consumo energetico effettivo risulta di circa 1 kg di vapore necessario per produrre 8-10 kg di acqua distillata. Si tratta in genere di vapore prodotto da caldaie ad alta pressione e parzialmente espanso in turbina fino alla pressione di spillamento. Il costo energetico dipende quindi dall'entalpia residua del vapore che alimenta dissalatore o meglio dalla differenza di entalpia fra il vapore effettivamente spillato dalla turbina e quello che avrebbe avuto nel condensatore della turbina. La differenza è consistente e misurabile come negli esempi seguenti, nei quali si fa riferimento a una temperatura di condensazione pari a 45 °C:

- spillamento a 6,0 bar assoluti (differenza di entalpia 165 kJ/kg, a cui si aggiunge l'eventuale surriscaldamento);
- spillamento a 0,5 bar assoluti (differenza di entalpia 60 kJ/kg, per vapore saturo).

Il consumo energetico per produrre 1 m³ di acqua dissalata sarà in media di 5 kWh/m³ termici nel primo caso, mentre nel secondo caso sarà di soli 1,9 kWh/m³

termici (cioè calcolati prima che la produzione elettrica venga penalizzata dal rendimento del turbogeneratore). A questo consumo va aggiunto quello elettrico delle macchine ausiliarie, pari a circa 1 kWh/m^3 in entrambi i casi.

Ovviamente il consumo energetico sarebbe improponibile se fornito tramite un vapore prodotto da una caldaia ausiliaria dedicata, in quanto potrebbe risultare anche di oltre 60 kWh/m^3 (termici).

Esistono dissalatori evaporativi che lavorano alle temperature di condensazione della turbina, senza sottrarre produzione elettrica alla stessa. In questo caso il consumo energetico si riduce ai soli ausiliari (vuoto e pompe), anche se di dimensioni maggiorate a causa della maggiore complicazione dell'impianto.

Certamente la diffusione e lo sviluppo degli impianti evaporativi sono anche legati alla possibilità di utilizzare il calore di scarto per l'alimentazione del dissalatore o comunque il calore recuperato da altri processi produttivi.

È da notare, infatti, che la dissalazione può ricevere calore a un livello termico anche molto più basso rispetto alla maggior parte degli altri processi produttivi, comprese la generazione elettrica e la raffinazione petrolifera, e quindi si presta molto bene allo sfruttamento di cascami termici industriali.

Tenendo in considerazione il crescente valore dell'energia, specialmente in un clima turbolento dei mercati, e la prevedibile scarsità futura di fonti energetiche, le valutazioni termodinamiche dei processi di dissalazione e la relativa efficienza degli impianti rappresentano degli elementi fondamentali sia per l'investitore sia per il tecnologo.

Nelle aree del mondo in cui la dissalazione è più necessaria spesso anche la generazione di elettricità è particolarmente scarsa, come nel nord dell'Africa o nel sud dell'India. In questi casi qualche ragionamento è doveroso sulle necessità primarie dell'uomo in quanto consumatore contemporaneamente di acqua e di energia: una famiglia che consuma $1 \text{ m}^3/\text{giorno}$ di acqua probabilmente avrà bisogno di 4 kWh/giorno di elettricità, che è esattamente il contenuto in energia di quel m^3 di acqua, se prodotta per osmosi inversa (che pure è un sistema relativamente conveniente dal punto di vista energetico).

Il dilemma che si pone in quei paesi è quindi quello di fornire elettricità oppure acqua al suo posto. La fornitura contemporanea di acqua e di elettricità risulta ovviamente necessaria, ma impone investimenti elevati, indirizzati alla produzione combinata di acqua e di elettricità e impone di sfasare i picchi orari di produzione di acqua con quelli di distribuzione dell'energia elettrica. L'acqua, infatti, può essere prodotta e quindi stoccata per essere distribuita in tempi diversi. La sfasatura nelle produzioni provoca però una riduzione del carico medio degli impianti di dissalazione, con un conseguente aumento dei costi di ammortamento: gli impianti, infatti, dovranno essere dimensionati per la capacità di punta e ammortizzati per la capacità media.

La soluzione ottimale verrà forse data dagli impianti ibridi (parte della produzio-

ne viene dall'osmosi inversa e parte dall'evaporazione): la produzione per osmosi inversa sarà massimizzata nelle ore vuote di vendita di elettricità, mentre la produzione per evaporazione sarà massimizzata nelle ore piene, in cui la generazione di vapore è massima (§ 3.5).

1.3.1. Confronto fra i consumi della dissalazione per evaporazione e per osmosi inversa

Si è visto quindi che uno spillamento di vapore dalla turbina alla pressione di 6 bar sottrae entalpia all'espansione in misura pari alla teorica produzione di circa 5 kWh per ogni m³ di acqua dissalata prodotta per evaporazione con quel vapore. Poiché un moderno impianto a osmosi inversa consuma circa 3 kWh per la produzione di 1 m³ di acqua dissalata (eventualmente aumentati fino a 4-4,5 kWh/m³ a causa dei consumi del sistema di pretrattamento e posttrattamento), sembra a prima vista che i consumi dell'osmosi inversa siano decisamente inferiori a quelli di ogni corrispondente impianto evaporativo.

In effetti, le cose non stanno proprio così, poiché il calcolo sommario sopra esposto non tiene conto dell'effetto cogenerativo della contemporanea produzione di potenza e di calore. L'entalpia sottratta all'espansione nello spillamento può essere reintegrata con una modesta produzione aggiuntiva di vapore alla caldaia (circa il 35% di quanto spillato) con cui alimentare la stessa turbina ad alta pressione. Il costo dell'entalpia spillata non è quindi quello della mancata produzione elettrica, bensì solo quello del combustibile aggiuntivo necessario per reintegrare il 100% di produzione elettrica. Il confronto fra i costi energetici è tale per cui il costo dell'entalpia spillata come vapore risulta pari a circa un terzo di quello della mancata produzione elettrica o dell'autoconsumo nel caso dell'osmosi inversa. In altre parole, l'energia per l'evaporazione può essere anche il doppio di quella per l'osmosi inversa, ma costa circa un terzo, quindi è economicamente più vantaggiosa. Naturalmente la convenienza totale di un sistema rispetto all'altro dipende anche da tanti altri fattori (si veda il capitolo 7).

1.4. DISSALAZIONE IN NATURA

Il ciclo naturale dell'acqua sul nostro pianeta è basato sulla dissalazione. Tutte le acque dolci superficiali infatti convergono verso il mare e dal mare inizia il ciclo. L'evaporazione dell'acqua marina avviene termicamente per riscaldamento solare. Il vapore acqueo raggiunge gli strati più alti e freddi dell'atmosfera, dove condensa fino a formare le nuvole, quindi ricade sotto forma di pioggia, per riprendere il cammino verso il mare e dare inizio a un nuovo ciclo.

Nelle ore di massima insolazione, la potenza termica solare può superare il

kW/m^2 e raggiunge anche il valore di $1,4 \text{ kW/m}^2$ in estate con cielo limpido e alle latitudini che consentono la perfetta perpendicolarità dei raggi solari. La potenza complessiva dell'irraggiamento solare sul pianeta è calcolata pari a 170.000 TW. Si tratta di una potenza enorme, superiore di oltre quattro ordini di grandezza all'intera potenza generata dall'uomo, calcolata oggi circa 12 TW come somma complessiva della potenza termica per riscaldamento, generazione elettrica e autotrazione. Parte della potenza solare viene riflessa, ma si può valutare che ogni m^2 di oceano esposto all'irraggiamento produca fino a circa 5 l/giorno di evaporato, destinato a ricadere sulla superficie del pianeta come pioggia. Questo dato di evaporazione riguarda le latitudini fino a circa 42° , ma si abbassa di molto vicino ai poli, dove l'angolo d'incidenza dell'irraggiamento solare riduce la quantità di energia effettivamente ricevuta. Purtroppo i venti spostano l'evaporato fino a posizionare nuvole e precipitazioni piovose in luoghi spesso distanti dalla formazione dell'evaporato e in modo non uniforme, tanto da creare zone umide a ampie zone aride. Anzi, quanto più una zona è arida e quindi calda, tanto più le correnti ascensionali nell'aria tenderanno a spostare l'evaporato verso zone più fredde dove potrà più facilmente condensare e coalescere dando origine alla pioggia. Durante la pioggia l'acqua distillata (formata dall'evaporato) attraversa l'atmosfera e si satura dei gas che la compongono. In particolare viene assorbita l'anidride carbonica, molto solubile in acqua e presente nell'atmosfera in concentrazione di circa 330-400 ppm. La pioggia ricade quindi con un leggero tasso di acidità naturale dovuta all'anidride carbonica, anche in assenza di elementi inquinanti. La pioggia viene assorbita dal terreno e percola attraverso vari strati di composizione diversa, incluse formazioni calcaree, dove l'anidride carbonica reagisce con il carbonato di calcio e forma bicarbonato.

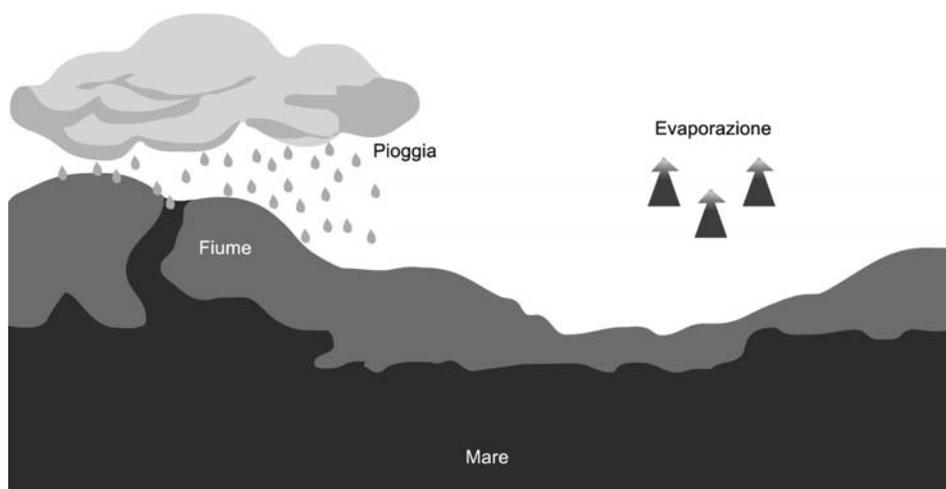


Figura 1.1
Ciclo naturale dell'acqua

L'acqua che sgorga dalle sorgenti si è quindi arricchita in bicarbonato di calcio che il nostro organismo si è evoluto a prediligere come il migliore sale potabilizzante.

La quantità di energia solare che irradia il pianeta è complessivamente impressionante, è quindi in grado di attivare il ciclo naturale dell'acqua nei termini cui si è abituati ed è pari a quasi 15.000 volte l'intera energia prodotta dall'uomo (termica, elettrica e nucleare).

La dissalazione evaporativa industriale copia il processo naturale e lo accelera in impianti progettati per massimizzare i flussi di produzione attraverso le fasi successive di evaporazione e condensazione. La dissalazione per osmosi inversa, invece, agisce in modo contrario a quanto avviene in natura (da qui la parola *inversa*). La pressione osmotica naturale tende a innalzare il livello dell'acqua salata rispetto a quella dolce di ben 280 metri (valore riferito a un'acqua di mare media salinità). L'osmosi inversa impone di pompare l'acqua di mare a ritroso, contro la pressione osmotica, fino a superarla e a generare il flusso contrario.

Qualunque sia la tecnica di dissalazione, il problema che le future generazioni dovranno porsi e risolvere è quello del valore dell'acqua potabile naturale e del suo costo rapportato al valore e al costo dell'acqua prodotta industrialmente. Si deve attribuire un valore all'acqua naturale, anche quando il costo è nullo e la disponibilità gratuita.

L'acqua prodotta industrialmente ha un costo di produzione che può sembrare più elevato del suo valore. Quando il prezzo dell'acqua dipenderà dal valore e non più dal costo di produzione, allora i problemi idrici del mondo potranno essere avviati a risoluzione.

1.5. DISSALAZIONE INDUSTRIALE

La dissalazione industriale ha lo scopo di produrre acqua dissalata con procedimenti che consentono di ottenere le necessarie portate di acqua, della qualità richiesta e con costi di investimento e consumi accettabili.

Diverse tecnologie sono state sviluppate nel corso degli ultimi decenni per conseguire lo scopo (§ 1.5.1), raggiungendo soddisfacenti sviluppi e diffondendosi in ampie zone del pianeta.

1.5.1. Cenni storici

La moderna dissalazione è nata alla fine dell'ottocento dalla necessità della Reale Marina Britannica di dotare le proprie navi di sistemi di generazione di acqua potabile e quindi di allungare i tempi di navigazione ben oltre quei limiti che prima erano dettati dalla necessità di rinnovare le riserve di acqua di bordo. La

diffusione dei motori a vapore da un lato permetteva di programmare crociere di più lungo raggio e dall'altra assicurava la disponibilità a bordo di energia (vapore) in grado di sostenere un processo industriale di dissalazione.

L'applicazione militare della dissalazione navale assicurava quindi anche un vantaggio strategico non indifferente per la flotta dispiegata in tutti gli oceani. Non a caso quindi i primi impianti di dissalazione evaporativi sono stati realizzati a Glasgow, in Scozia, dove già operavano i principali cantieri navali britannici. Il vecchio Lord Weir ha così iniziato l'applicazione della tecnologia a flash singolo e multiplo che col tempo si è raffinata e diffusa nel mondo. Fino alla seconda guerra mondiale la tecnologia è comunque rimasta un quasi monopolio britannico (la società costituita a tale scopo prese il nome di Weir Westgarth, con sede nella periferia di Glasgow).

Il primo impianto Weir di cui si ha notizia certa fu inaugurato nel 1885 e consisteva in un'unità di flash. Tale impianto fu realizzato interamente in lega di rame, secondo le tecniche costruttive proprie dell'epoca per la cantieristica navale.

La diffusione della dissalazione per uso civile ha avuto inizio negli anni '50, spinta dalla nascente ricchezza dei paesi esportatori di petrolio, ma con la necessità di incrementare la disponibilità di acqua potabile. Il Kuwait è stato fra i primi paesi a commissionare impianti industriali alla Weir Westgarth da installare nel proprio territorio per produrre acqua potabile sulla terraferma.

Negli anni '60, vista l'espansione di un promettente mercato, è nata una concorrenza internazionale alla Weir Westgarth, con poli tecnologici in Italia (SIR: Società italiana resine), in Germania (Krupp), in Francia (Sidem) e negli USA (Westinghouse). In seguito sono entrati nel mercato anche i Giapponesi (Sasakura).

La tecnologia era esclusivamente evaporativa e la molteplicità dei poli tecnologici ha consentito un rapido sviluppo e un miglioramento degli impianti, spesso dotati di caratteristiche diverse a seconda della scuola di progettazione propria di ciascun polo.

Alla fine degli anni '60 in Italia alla SIR si sono affiancati altri gruppi industriali, inizialmente portatori di licenze, come Franco Tosi (licenza Westinghouse) e Sowit (licenza Weir Westgarth). La tecnologia originale SIR, dopo il dissesto della società, fu ereditata in parte dalla Snamprogetti e in parte dall'allora EFIM (Bosco e Reggiane) e quindi dall'Ansaldo.

La Italmimpianti (ora divisione FISIA di Impregilo) iniziò a progettare i grandi impianti di dissalazione (di cui oggi è leader mondiale) con l'assunzione di ex-progettisti SIR e su questa base ha progressivamente maturato un'esperienza di grande valore, tanto da essere tuttora considerata leader nel mondo per i grandi impianti multiflash.

Il mercato della dissalazione in Italia si è sviluppato ed è rimasto florido fino alla prima metà degli anni '80, sostenuto dai grandi investimenti industriali allora in corso. Le centrali ENEL e le grandi raffinerie (AGIP e SARAS) venivano invitate

dagli enti governativi e locali a non emungere grandi quantitativi di acqua dalle falde, ma a rendersi indipendenti nel soddisfare i propri fabbisogni mediante la dissalazione. In tal modo le falde sono state (seppure solo in piccola parte) preservate per gli usi civili e potabili.

Durante questi anni l'esperienza acquisita specialmente da Sowit, Reggiane e Ansaldo, ha permesso alle aziende italiane di guadagnarsi anche consistenti quote del mercato internazionale, grazie all'esportazione di impianti chiavi in mano.

I tentativi di sviluppare una tecnologia a multiplo effetto affidabile non ebbero gran successo fino alla metà degli anni '80 a causa dei problemi legati al difficile controllo delle incrostazioni sui tubi di scambio termico. Negli impianti multistadi (MSF) la salamoia viene riscaldata all'interno dei tubi di scambio e quindi eventuali incrostazioni possono essere ispezionate e rimosse dalle casse d'acqua. Negli impianti a multiplo effetto (MED) la salamoia si concentra per evaporazione sulla superficie esterna dei tubi, impossibile da ispezionare quando i tubi vengono assemblati in fasci compatti.

Il merito di aver trovato le condizioni operative adatte all'esercizio del MED in sicurezza va essenzialmente alla scuola francese e ai tecnologi della Sidem, che hanno studiato il processo e ne hanno dimostrato l'affidabilità e la convenienza a temperature di esercizio sufficientemente basse. Contemporaneamente, in Israele nasceva la IDE, che ha autonomamente sviluppato il processo MED con alcuni elementi caratteristici di buon impatto sul contenimento dei costi di realizzazione.

Gli impianti tipo MED, inizialmente di piccola taglia, si sono progressivamente diffusi, raggiungendo capacità produttive unitarie di oltre 1500 m³/h, inizialmente appannaggio dei soli MSF. Contemporaneamente, a partire dagli anni 90, il processo MSF si è dimostrato non conveniente se non per gli impianti più grandi. I progettisti MSF hanno quindi sperimentato impianti di sempre maggiore capacità unitaria, fino agli attuali 2500 m³/h. Questi grandi impianti sono ora richiesti praticamente solo per le infrastrutture dei paesi arabi, dove il fabbisogno di acqua è in crescita esponenziale, dove la disponibilità di energia è ampia e dove infine abbondano anche le risorse finanziarie.

L'osmosi inversa è nata molto tempo dopo, mentre gli impianti evaporativi già si stavano diffondendo con successo nel mondo. I primi studi iniziarono negli USA nel 1956, con una collaborazione fra le Università della Florida e della California del Sud, a cura di due giovani (allora) professori, Loeb e Sourirajan.

La prima membrana fu prodotta in laboratorio nel 1959 e il primo impianto sperimentale nel 1965, progettato per produrre 19 m³/g da acqua salmastra. Il secondo impianto da 38 m³/g venne alla luce solo due anni dopo, dando quindi inizio alla produzione industriale di acqua dissalata da acqua salmastra per osmosi inversa.

La diffusione dell'osmosi inversa è stata lenta all'inizio perché penalizzata dagli

alti consumi di elettricità, dalla scarsa affidabilità degli impianti e dalla vita molto breve delle membrane. I progressi tecnologici da allora sono stati enormi, tanto da consentirne oggi l'applicazione (in molti casi convenientemente) anche all'acqua di mare e non solo all'acqua salmastra.

La pressione osmotica da vincere con la pressione di esercizio è infatti una funzione diretta della salinità dell'acqua grezza. Nel caso dell'acqua di mare si tratta di circa 28-30 atmosfere in condizioni statiche e 65-70 atmosfere in condizioni dinamiche (incluse le perdite di carico attraverso le membrane). È quindi evidente la convenienza dell'osmosi inversa nel caso del trattamento dell'acqua salmastra, quando la pressione osmotica è molto inferiore, quindi i consumi energetici molto più contenuti. Il vero impulso all'osmosi inversa si è avuto negli anni '90 con l'invenzione dei sistemi di recupero energetico dalla salamoia in pressione attraverso l'applicazione di turbine sullo scarico. Il consumo netto energetico è quindi sceso da 10-12 kWh/m³ a 6-7 kWh/m³ per l'acqua di mare. La convenienza all'applicazione dell'osmosi inversa alla dissalazione dell'acqua di mare è nata allora.

Successivamente sono stati introdotti sistemi più efficienti di recupero energetico (scambiatori di pressione) ed è migliorata la qualità delle membrane tanto da abbassare ulteriormente le perdite di carico in modo significativo. Oggi è normale prevedere consumi di soli 3 kWh/m³ anche per l'acqua di mare. Gli eventuali ulteriori assorbimenti degli impianti di pretrattamento e posttrattamento aumentano il consumo complessivo, che però in genere rimane sotto i 4,5-5 kWh/m³. I miglioramenti tecnologici dell'osmosi inversa ne hanno consentito l'applicazione su scala sempre più ampia, specialmente nei casi di acqua salmastra, qualora le esigenze produttive siano stagionali o comunque ammettano periodi di fermo per manutenzione, sostituzione membrane e verifica degli impianti ausiliari.

Il costo di acquisto delle membrane è andato progressivamente calando via via che la maggiore richiesta consentiva risparmi di scala nella produzione. L'impiantistica generale a corredo delle membrane è piuttosto semplice, tanto da consentire l'assemblaggio degli impianti anche a costruttori non specializzati e quindi a basso costo e spesso vicini al luogo di installazione. Tutto ciò ha ridotto considerevolmente i costi totali di investimento iniziale, ora in genere inferiori ai corrispondenti impianti evaporativi di uguale capacità.

La produzione di membrane è saldamente in mano a un numero ristretto di grandi aziende, la maggior parte americane (Hydranautics, DuPont, Dow Filmtec, General Electric), una giapponese (Toray) e poche altre con le capacità finanziarie per emergere. Nessun italiano è rimasto con una presenza significativa nel settore. In Italia sono presenti invece molti assemblatori di impianti, a volte con accordi preferenziali in essere con i produttori di membrane come necessità per aumentare l'affidabilità complessiva e diminuire i costi di produzione.

Alcuni problemi connessi al processo di osmosi inversa sono ancora in attesa di soluzione e rappresentano attualmente oggetto di studi approfonditi e di sperimentazione. Fra questi il più dibattuto è il problema del boro, i cui effetti negativi sull'organismo umano e animale non sono del tutto noti e quindi le norme sui limiti di ammissibilità non sono ancora uniformi né consolidate. In ogni caso, il trattamento a osmosi inversa si è dimostrato in gran misura inefficace nella riduzione sostanziale del boro, fino a rischiare il superamento dei limiti consentiti anche dalle normative più lassiste (§ 2.1).

La tendenza attuale è quella di preferire gli impianti a osmosi inversa per la produzione di acqua potabile e gli impianti evaporativi per l'acqua di processo e industriale. Il valore dell'acqua potabile è infatti considerato più basso, in quanto riferibile a tariffe di vendita con impatto sociale e quindi necessariamente poco costose. L'acqua potabile deve perciò essere prodotta a basso costo, anche a scapito della qualità chimica, poiché si devono rispettare solo i parametri della qualità organolettica. Infine, l'acqua prodotta per osmosi inversa può essere miscelata con acqua potabile di altra origine, al fine di distribuire un prodotto finale di qualità complessivamente buona, oppure può essere raffinata attraverso un secondo passaggio sulle membrane, in modo da ottenere una migliore qualità chimica del prodotto finale.

Il valore dell'acqua di processo (acqua distillata) è considerato più alto, in quanto si tratta di una materia prima necessaria alla produzione di beni di più alto valore aggiunto, come l'energia elettrica. La produzione di vapore per le turbine richiede ad esempio acqua di elevatissima purezza, come si può ottenere preferibilmente da impianti evaporativi.

È evidente che la potabilizzazione dell'acqua distillata rappresenta un costo ulteriore a cui è associata una perdita di valore commerciale, quindi si tratta di una operazione complessivamente non conveniente. Solamente alcuni fra i più ricchi paesi arabi continuano a preferire l'evaporazione anche per la produzione di acqua potabile. La disponibilità di un'acqua di partenza chimicamente più pura consente infatti di ottenere (seppure a costo elevato) un'acqua potabile della composizione voluta, tramite un'adeguata formulazione dei sali da aggiungere durante la rimineralizzazione.

In altre circostanze, l'eventuale presenza residua dei sali marini (ad esempio sodio e cloruri) non può essere eliminata con trattamenti semplici e quindi rappresenta un limite qualitativo, poiché gli altri sali potabilizzanti possono essere soltanto aggiunti.

La diffusione degli impianti per la produzione di acqua industriale ha comunque un effetto rilevante sulla disponibilità di acqua complessiva e potabile in particolare, in quanto preserva la produttività delle falde naturali per uso potabile, sottraendole alla competizione per usi industriali, a volte imponenti come nel caso dell'industria dell'acciaio o della generazione di elettricità.