

Emilio Gabbrielli

**SETTEMILA ANNI DI STORIA
DELLA DISSALAZIONE
DELL'ACQUA DI MARE**

RECENTI SCOPERTE ARCHEOLOGICHE ANTICIPANO
DI ALMENO CINQUEMILA ANNI L'USO DELLA DISTILLAZIONE



ANGELO PONTECORBOLI EDITORE
FIRENZE

RINGRAZIAMENTI

L'editore e l'autore di questo libro desiderano ringraziare le istituzioni e le persone che hanno concesso il permesso di riprodurre fotografie e materiale. Sebbene sia stato fatto ogni sforzo per rintracciare e riconoscere i detentori dei diritti d'autore, ci scusiamo in caso di errori o omissioni.

IN COPERTINA

Disegno di Leonardo da Vinci, *Fornacello da-sstillare acqua forte*
©Veneranda Biblioteca Ambrosiana/Mondadori Portfolio.

IN QUARTA DI COPERTINA

Impianto di dissalazione solare della Boquete Nitrate Company nella miniera Oficina Domeyko, Antofagasta, Cile, 1907. Fonte: "The Illustrated London News", N. 243, 15 agosto 1908.

Progetto editoriale: *Angelo Pontecorboli*

Tutti i diritti riservati

Angelo Pontecorboli Editore, Firenze
www.pontecorboli.com – info@pontecorboli.it

ISBN 978-88-3384-198-4

Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, distribuita o trasmessa in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo, comprese fotocopie, registrazioni o altri mezzi elettronici o meccanici, senza il previo consenso scritto dell'editore, ad eccezione di brevi citazioni in recensioni critiche e di alcuni altri usi non commerciali consentiti dalla legge sul copyright. Per le richieste di autorizzazione, contattare l'editore all'indirizzo e-mail info@pontecorboli.it.

INDICE

9	Prefazione di Miriam Balaban
10	Abbreviazioni
11	Introduzione
15	Parte I - LA DISSALAZIONE NEL PASSATO
17	1. La dissalazione dalla preistoria fino alla caduta dell'Impero Romano
17	1.1. La dissalazione nella preistoria: scoperte che riscrivono la storia
26	1.2. La dissalazione dalla Grecia antica fino alla caduta dell'Impero Romano
	La dissalazione termica o evaporativa, ovvero per distillazione
	La dissalazione con vasi di cera
	La dissalazione con la sabbia del mare e altri materiali porosi
33	1.3. La dissalazione antica nelle altre parti del mondo
	La Cina
	Il subcontinente indiano
	Le Americhe
	L'Oceania
41	2. La dissalazione dall'Alto Medioevo fino alla scoperta dell'America
42	2.1. Gli Arabi
45	2.2. I Cinesi
49	2.3. Gli Europei
51	3. La dissalazione dal XVI al XVIII secolo
51	3.1. Il XVI secolo
57	3.2. Il XVII secolo
63	3.3. Il XVIII secolo
	Il problema dominante: il cattivo sapore dell'acqua dissalata
	La scoperta dell'osmosi
	La dissalazione per congelamento
	La dissalazione usando energia solare
	La dissalazione per filtrazione attraverso materiali porosi: realtà o immaginazione?
	La fine del secolo
77	Parte II - LA DISSALAZIONE NELL'ERA MODERNA
79	1. Il XIX secolo
79	1.1. Alla metà del XIX secolo la dissalazione "approda" sulla costa occidentale del Sud America
90	1.2. Charles Wilson introduce la dissalazione a energia eolica e solare: Las Salinas (1873)
97	1.3. Lo sviluppo mondiale della dissalazione alla fine del XIX secolo
	I luoghi
	I produttori industriali
109	2. La prima metà del XX secolo: la stasi della dissalazione per uso potabile e lo sviluppo delle applicazioni industriali
109	2.1. La dissalazione termica o evaporativa, ovvero per distillazione
114	2.2. I primordi della dissalazione con membrane e le prime applicazioni commerciali dello scambio ionico

119	3. La seconda metà del XX secolo: l'esplosione mondiale della dissalazione
119	3.1. 1950-1960 Il Dopoguerra: il rinnovato interesse per la dissalazione
123	3.2. 1960-1970 La decade cruciale nella storia della dissalazione
134	3.3. 1970-2000 L'auge della dissalazione per distillazione e il decollo della dissalazione con membrane
145	4. Il XXI secolo: il crollo del costo della dissalazione con membrane, dissalazione e riuso diventano fonti primarie di acqua dolce
147	4.1. L'Arabia Saudita e gli Emirati Arabi Uniti costruiscono i più grandi impianti di dissalazione per distillazione (MSF e MED) mai realizzati
149	4.2. La dissalazione per osmosi inversa (RO) dell'acqua di mare diventa la tecnologia dominante
160	4.3. Alcuni Paesi adottano strategicamente la dissalazione per osmosi inversa dell'acqua di mare e il riuso Spagna Singapore Israele, Algeria e gli altri Paesi del Nord Africa Australia Cina e India
175	Epilogo. Il futuro della dissalazione
183	APPENDICE
183	1. Perché dissalare?
187	2. Tecniche della dissalazione nell'era moderna
188	2.1. Le tecnologie termiche o evaporative, basate sulla distillazione Distillazione a Multiplo Effetto (MED) Distillazione Istantanea (Flash) a Stadi Multipli (MSF) Distillazione solare Compressione del vapore (VC)
193	2.2. Le tecnologie basate su membrane semipermeabili Elettrodialisi (ED) Osmosi inversa o <i>reverse osmosis</i> (RO)
199	2.3. I sistemi ausiliari necessari per la dissalazione La presa dell'acqua da dissalare La filtrazione e il pretrattamento dell'acqua da dissalare Lo smaltimento dell'acqua concentrata dopo l'estrazione dell'acqua dolce Il post-trattamento dell'acqua dolce prodotta
205	2.4. Lo scambio ionico (IX)
207	2.5. Il riuso
208	2.6. Altri metodi non convenzionali di produzione di acqua dolce La cattura dell'acqua direttamente dall'aria La dissalazione per congelamento
211	CREDITI
215	BIBLIOGRAFIA
225	INDICE DEI NOMI
226	INDICE DEI LUOGHI
231	INDICE DEGLI ARGOMENTI

*Dedicato a mia moglie Monica
e ai miei figli Ilaria e Luca.*

*Un riconoscimento speciale e la
mia infinita gratitudine a tutti
coloro che hanno contribuito a
rendere la dissalazione ciò che
è oggi.*

Dissalazione a membrana
Pionieri della soluzione dei problemi

Quando, all'inizio degli anni Sessanta, la dissalazione a osmosi inversa (RO) è passata dal laboratorio alle installazioni reali, le sfide progettuali e operative da superare erano molte. È stato necessario rivedere le procedure e i regimi operativi e formare nuovamente gli operatori. Il contributo innovativo e pieno di risorse di questi pionieri ha fatto sì che la dissalazione a membrana diventasse una tecnologia affidabile e conveniente per purificare l'acqua o concentrare correnti liquide per il recupero di prodotti preziosi o il riuso dell'acqua. I loro successi hanno aperto la strada al miglioramento della tecnologia e hanno facilitato l'evoluzione dell'industria multimiliardaria che è oggi la dissalazione a membrana.

Randy Truby

PREFAZIONE

Questa storia della dissalazione è molto affascinante per gli esperti e per i non addetti ai lavori, poiché l'acqua è essenziale per la vita sulla terra.

L'attrattiva del libro è dovuta anche al fatto che l'autore colloca l'acqua nel panorama della storia dell'**Uomo** nel mondo. La sua leggibilità è dovuta allo stretto rapporto dell'autore con i personaggi chiave del settore della dissalazione negli ultimi decenni.

La dissalazione è diventata una tecnologia importante nel mondo, in grado di fornire acqua e altri elementi dal mare e persino dalle acque reflue.

Fin dai tempi della Bibbia, e anche prima, l'acqua è stata riconosciuta come un elemento fondamentale per la vita sulla terra. Trovare fonti d'acqua è sempre stata una sfida per le piccole popolazioni. Con un po' di ingegno, spesso è stato possibile trovare l'acqua per sostenere la vita sul pianeta. Mentre l'acqua era scarsa sulla terraferma, era abbondante negli oceani, ma viaggiare in mari salati richiedeva la rimozione del sale. I primi metodi di dissalazione furono quindi ideati da questi navigatori.

La dissalazione dell'acqua è stata presa in considerazione nel corso dei secoli da filosofi, tecnologi e intere popolazioni. Con l'aumento dinamico delle persone in tutto il mondo, e in particolare in alcune aree in cui l'acqua scarseggia, il problema della carenza idrica si è acuito.

Con lo sviluppo della scienza e della tecnologia, il bisogno di acqua ha spinto individui e organizzazioni ad affrontare il problema. Si sono così sviluppate un'industria e una comunità scientifica in piena espansione.

Emilio Gabbrielli ha composto un affascinante resoconto di questa storia nel corso dei secoli in questo libro di grande leggibilità.

In una sezione separata presenta anche informazioni sulla dissalazione, sulla storia del fabbisogno idrico e sullo sviluppo della tecnologia di dissalazione per il lettore profano, fornendo anche riferimenti ad alcuni dei testi tecnici che stanno alla base di questa dinamica storia della dissalazione.

È gratificante vedere che un giovane professionista, che ho incoraggiato a pubblicare diversi articoli sulla mia rivista "Desalination" negli anni '70 e '80, abbia ora realizzato un libro con la storia della nostra tecnologia.

Miriam Balaban
Capo redattore, "Desalination", "Desalination and Water Treatment"
Segretaria Generale della Società Europea della Dissalazione (EDS)

Abbreviazioni

BC	Concentratori di Salamoia (<i>Brine Concentrators</i>)
BOOT	Costruire, Possedere, Gestire, Trasferire (<i>Build, Own, Operate, Transfer</i>)
BWRO	Osmosi inversa dell'acqua salmastra (<i>Brackish Water Reverse Osmosis</i>)
DNA	Acido desossiribonucleico (molecola che trasporta le informazioni genetiche per lo sviluppo e il funzionamento di un organismo)
DBO	Progettare, Costruire, Gestire (<i>Design, Build, Operate</i>)
DPR	Riuso Potabile Diretto (<i>Direct Potable Reuse</i>)
D&C	Progettare e Costruire (<i>Design and Construct</i>)
ED	Elettrodialisi (<i>ElectroDialysis</i>)
EDR	Elettrodialisi inversa (<i>Electro Dialysis Reversal</i>)
EDS	Società Europea di Dissalazione (<i>European Desalination Society</i>)
EIS	Studio di Impatto Ambientale (<i>Environmental Impact Study</i>)
ERD	Dispositivo di recupero di energia (<i>Energy Recovery Device</i>)
EPA	Agenzia per la Protezione dell'Ambiente (<i>Environmental Protection Agency</i>)
GWI	Intelligenza Globale sull'Acqua (<i>Global Water Intelligence</i>)
IDA	Associazione Internazionale di Dissalazione (<i>International Desalination Association</i>)
IDEA	Associazione Internazionale di Dissalazione e Ambiente (<i>International Desalination & Environmental Association</i>)
IDRA	Associazione Internazionale di Dissalazione e Riuso (<i>International Desalination and Reuse Association</i>), nuovo nome dell'IDA dal 2023
IPR	Riuso Potabile Indiretto (<i>Indirect Potable Reuse</i>)
IX	Scambio ionico (<i>Ion exchange</i>)
IWMI	Istituto Internazionale per la Gestione dell'Acqua (<i>International Water Management Institute</i>)
MED	Distillazione a Multiplo Effetto (<i>Multiple Effect Distillation</i>)
MENA	Paesi del Medio Oriente e del Nord Africa (<i>Middle East and North Africa</i>)
MF	Microfiltrazione (<i>Microfiltration</i>)
MGD o mgd	Milioni di galloni americani al giorno (<i>Million Gallons per Day</i>)
MIT	Istituto di Tecnologia del Massachusetts (<i>Massachusetts Institute of Technology</i>)
MLD o mld	Milioni di litri al giorno (<i>Million Liters per Day</i>)
MSF	Distillazione istantanea a stadi multipli (<i>Multi-Stage Flash distillation</i>)
MVC	Compressione meccanica del vapore (<i>Mechanical Vapour Compression</i>)
NF	Nanofiltrazione (<i>Nanofiltration</i>)
NVC	Centro visitatori della NEWater (<i>NEWater Visitor Centre</i>)
OMS	Organizzazione Mondiale della Sanità (cfr. WHO)
ONG	Organizzazione Non Governativa
OSW	Ufficio delle Acque Saline (<i>Office of Saline Water</i>)
PAD	Programma Acqua Dolce (<i>Programa Água Doce</i>)
PPP	Partecipazione Pubblico Privato
PSU	Unità Pratica di Salinità (<i>Practical Salinity Unit</i>)
PUB	Consiglio dei Servizi Pubblici (<i>Public Utilities Board</i> , adesso <i>National Water Agency</i>)
RO	Osmosi inversa (<i>Reverse Osmosis</i>)
SWA	Autorità Idrica Saudita (<i>Saudi Water Authority</i>), nuovo nome della SWCC dal 2024
SWCC	Società di Conversione dell'Acqua Salina (<i>Saline Water Conversion Corporation</i>)
SWRO	Osmosi inversa dell'acqua di mare (<i>Sea Water Reverse Osmosis</i>)
TDS	Solidi Totali Disciolti (<i>Total Dissolved Solids</i>)
TVC	Compressione Termica del Vapore (<i>Thermal Vapour Compression</i>)
UCLA	Università della California, Los Angeles (<i>University of California, Los Angeles</i>)
UAE	Emirati Arabi Uniti (<i>United Arab Emirates</i>)
UF	Ultrafiltrazione (<i>Ultrafiltration</i>)
USA	Stati Uniti d'America (<i>United States of America</i>)
VC	Compressione del vapore (<i>Vapour Compression</i>)
WDR	Rapporto sulla Dissalazione dell'Acqua (<i>Water Desalination Report</i>)
WHO	Organizzazione Mondiale della Sanità (<i>World Health Organization</i>)
ZLD	Scarico liquido zero (<i>Zero Liquid Discharge</i>)

INTRODUZIONE

“Alcuni rendono potabile l’acqua del mare nella seguente maniera: ponendo dei recipienti pieni di acqua di mare su un gran fuoco e raccogliendone il vapore in adatti coperchi posti al di sopra, si può ricavare acqua dolce. [Questo perché] l’acqua salata diventa dolce quando si trasforma in vapore e il vapore non forma di nuovo acqua salata quando condensa”.

Credo che la maggioranza di noi, anche senza sapere nulla della dissalazione¹ dell’acqua di mare, conosca di fatto questo metodo, che è uno dei più comuni e antichi. Questa frase suona familiare anche perché fa pensare a quando, nel quotidiano, si scoperchia la pentola con l’acqua salata che bolle per buttare la pasta e dal coperchio cadono copiose gocce di vapore condensato, che sono di acqua dolce essendo il sale rimasto nell’acqua di cottura.

Questa frase così moderna e facile da capire è in realtà la traduzione letterale di un passo dei commenti di Olimpiodoro il Giovane a *Meteorologica*, scritto da Aristotele (384-322 a.C.), ossia quasi duemila quattrocento anni fa. Questo ci dice che la dissalazione dell’acqua di mare o salmastra, anche se solo in tempi recenti è diventata sempre più di uso comune e applicata su larga scala, è una tecnologia conosciuta e usata dall’antichità. Non solo, si vedrà anche che Aristotele può essere sì stato il primo a scrivere sulla dissalazione, ma questa era in realtà già conosciuta nel bacino del Mediterraneo e nel mondo, e forse usata a bordo delle navi, già millenni prima di lui. Anche Aristotele menziona studiosi precedenti, ma lui probabilmente si riferisce solo ad alcuni che lo precedettero di appena qualche secolo.

La maggior parte degli autori che tratta della storia della dissalazione ama dire che il primo testo che ne parla è la Bibbia. Ciò avviene nell’Esodo, dove si racconta che Mosè, dopo aver attraversato il Mar Rosso alla testa dei Figli di Israele, dovette affrontare il problema della mancanza di acqua potabile nel Deserto del Sinai e lo risolse con l’aiuto di Dio che mostrò loro come dissalare l’acqua. In realtà la Bibbia dice che gli Ebrei avevano sì trovato dell’acqua, ma che era troppo “amara” per essere bevuta. Allora Dio indicò a Mosè un tipo di legno speciale, che una volta messo nell’acqua tolse l’“amaro”, qualunque ne fosse la causa, e la rese potabile.

Non penso che si debba considerare questo evento miracoloso come il primo esempio di dissalazione perché, anche se in quello specifico frangente l’unico che

¹ Il nome dissalazione e il verbo dissalare sono sinonimi di desalinizzazione e desalinizzare. I primi due saranno quelli adottati in questo libro perché sono quelli che uso normalmente.

avrebbe potuto “potabilizzare” quell’acqua non bevibile per salvare il popolo ebraico era certamente Dio, e per fortuna lo fece, gli esseri umani erano già sulla strada per poterlo fare, o l’avevano già fatto, anche da soli con mezzi non divini e fisici. Resta il fatto che, senza l’aiuto divino diretto, l’uso del legno non ebbe seguito, sebbene pochi secoli dopo nell’antica Grecia sarebbero stati provati, senza successo, vari tipi di legno, e in Cina con il bambù si ebbe solo qualche risultato parziale.

È possibile risalire a tre o quattromila anni prima dell’Esodo, a alambicchi molto più antichi che, anche se non si sa se furono usati per dissalare l’acqua, sarebbero stati adatti per farlo se fosse stato necessario. È addirittura possibile che la dissalazione sia iniziata a bordo delle navi degli esploratori dell’Oceano Pacifico orientale cinquemila anni fa, un’epoca in cui molti abitanti della Terra dovevano essere già coscienti della pratica descritta da Aristotele per il loro modo di cucinare, con recipienti che, di fatto, sono un tipo di alambicco. È quindi ragionevole far iniziare la storia della dissalazione da lì? Ritengo di sì.

La dissalazione si è sviluppata progressivamente durante i millenni e i secoli fino a quando, negli ultimi centocinquanta anni, e soprattutto dopo la Seconda Guerra Mondiale, è esplosa a fronte di una crescente crisi idrica globale. Spesso senza che ce ne rendessimo conto, è diventata parte integrante della fornitura di acqua potabile in molte città come Londra, Barcellona, Perth e Singapore, e soprattutto in Medio Oriente e Nord Africa, ad esempio a Riyadh, Abu Dhabi, Dubai, Tel Aviv e Algeri, ma anche per industrie fra le più importanti e l’agricoltura.

Ormai impianti di dissalazione sono presenti in quasi tutti i Paesi del mondo e più del 5% dell’umanità consuma quotidianamente acqua dissalata dal mare. È da più di 50 anni che un numero crescente di Paesi produce parte dell’acqua dolce consumata dissalando l’acqua del mare o acque salmastre, oppure trattando di nuovo, normalmente con le stesse tecniche della dissalazione, l’acqua già usata riutilizzandola poi, rigenerata, per le applicazioni appropriate.

Anche in campo industriale senza poter dissalare l’acqua, tanto per menzionare alcuni settori, non potremmo produrre energia elettrica per via termica, non potremmo produrre la maggior parte dei componenti dell’elettronica, soprattutto i chips, spesso non potremmo estrarre il petrolio dai giacimenti sottomarini; la dissalazione è fondamentale per produrre buona carta, buona birra, buon acciaio, buone automobili, ... Inoltre, in varie parti del mondo l’agricoltura non potrebbe andare avanti senza usare anche l’acqua dissalata.

È quindi con entusiasmo che ho accettato la proposta di Angelo Pontecorboli di scrivere questo libro, che potesse colmare un vuoto editoriale che aveva rilevato. Si spera che i lettori si intratterranno piacevolmente e si sorprenderanno a ripercorrere la storia della dissalazione dell’acqua di mare dai tempi antichi fino ai giorni nostri, dando uno sguardo anche al futuro. Sarà inoltre un modo per acquisire più dimestichezza con una tecnologia che già è, e sempre più diventerà, parte del nostro

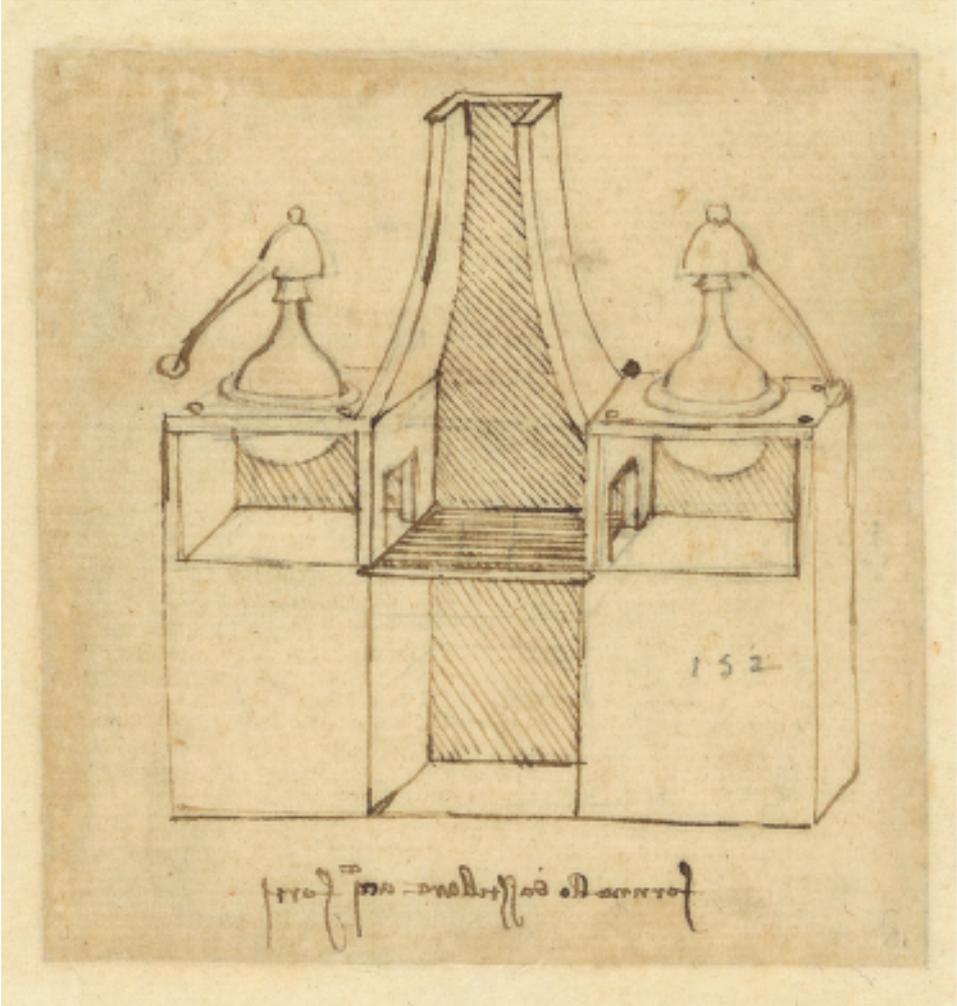
quotidiano, come già credevano Giorgio Nebbia e la moglie Gabriella Menozzi dell'Università di Bari negli anni Sessanta, che per primi ricostruirono sistematicamente la storia antica della dissalazione, ampiamente documentata nella letteratura di ogni tempo, e al cui aiuto e ispirazione farò spesso ricorso in questo volume.

Mi auguro che i lettori trovino lo sviluppo della dissalazione e le sue applicazioni lungo i suoi settemila anni di storia tanto affascinante e interessante quanto l'ho trovato io man mano che ne sono venuto a conoscenza durante la mia carriera professionale nel settore. Spero che anche i colleghi della comunità internazionale della dissalazione siano interessati a leggere questo racconto della nostra tecnologia, ma desidero enfatizzare che questo è e vuole essere anche un testo divulgativo. Un libro che possa essere letto piacevolmente anche dai non iniziati, che non siano interessati ai dettagli tecnici, ma lo siano nei confronti dello sviluppo storico/sociale di una tecnologia antica che è diventata di rilevanza fondamentale ai giorni nostri.

Esistono molti ottimi libri e pubblicazioni sulla dissalazione, e innumerevoli articoli tecnici, oltre a quelli citati in questo volume, che spiegano le particolarità delle varie tecniche e il loro funzionamento, o che ne affrontano la storia in forma dettagliata e dal punto di vista tecnologico: chi volesse approfondire ha solamente l'imbarazzo della scelta. Per chi fosse interessato a studiare la storia della dissalazione del passato il miglior riferimento è ai lavori di Giorgio Nebbia e Gabriella Menozzi, che arrivano anche a interrogarsi sulle domande degli antichi riguardo alle proprietà dell'acqua, l'origine dei mari e dei fiumi, sul perché il mare sia salato, quale ne sia la causa e così via, e a quelli dell'amico James Birkett, anch'egli citato frequentemente in questo volume, che spinge la sua analisi fino a tempi più recenti di quello che fecero i coniugi Nebbia-Menozzi.

Una cosa è certa: se scegliere di quali scienziati e avvenimenti parlare in questo libro nei secoli passati è stato difficile, l'impresa è stata quasi impossibile per la dissalazione degli ultimi 70 anni dove le ricerche, invenzioni, miglioramenti di migliaia di tecnici, operatori, produttori, ricercatori, inventori, consulenti e studiosi hanno collettivamente portato la dissalazione a dove è oggi, quando può giocare un ruolo importante per affrontare la crisi idrica mondiale. Il collega Ghassan Ejje ha giustamente detto in un recente messaggio in cui discuteva l'utilità di un libro come questo con altri veterani del settore:

Sebbene negli ultimi 60-70 anni la dissalazione abbia contribuito a risolvere alcune situazioni particolari . . . , il cambiamento climatico, la desertificazione e la crisi idrica sono una minaccia per la nostra stessa esistenza. Riuscite a immaginare il mondo dove è oggi se non ci fossero i progressi dell'industria della dissalazione?
[Trad. d'A.]



23. Sistema con due alambicchi disegnato da Leonardo da Vinci con dicitura autografa "Fornacello da stillare acqua forte" (@Veneranda Biblioteca Ambrosiana/Mondadori Portfolio).

3.

La dissalazione dal XVI al XVIII secolo

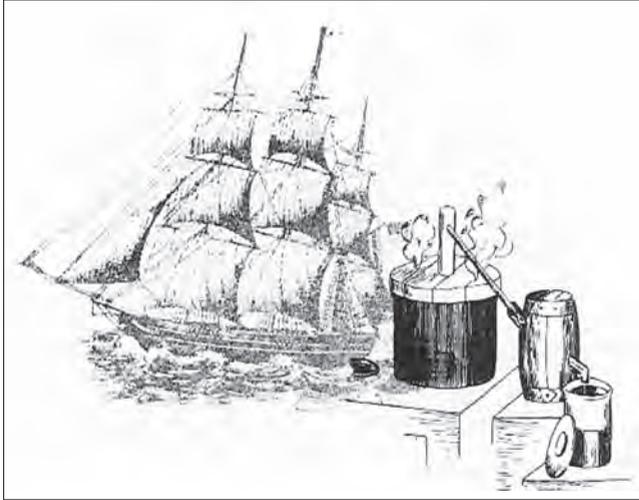
3.1. Il XVI secolo

L'inizio dell'epoca dei grandi viaggi di esplorazione e conquista degli Europei comportò il dover affrontare e risolvere una serie di problemi mai sperimentati dai navigatori dell'Occidente, che fino a quel momento si erano limitati a viaggi nel Mediterraneo, o al massimo lungo le coste atlantiche europee o africane, senza mai essere molto distanti da un possibile attracco sulla costa. Anche i Vichinghi non si erano mai allontanati molto dalla terraferma nei loro viaggi verso il Nord America.

Una volta che una nave si avventurava nell'attraversamento di un oceano, fosse questo l'Atlantico o, pochi anni dopo, il Pacifico e in una certa misura anche l'Indiano, per l'approvvigionamento delle navi si doveva tenere in conto che probabilmente non si sarebbe trovato terra dove rifornirsi per molte settimane, il cui numero era imprevedibile. Da qui la necessità di avere a bordo ingenti quantità di derrate alimentari e acqua e di conservarle in buono stato nonostante le scarse condizioni igieniche. Spesso l'acqua conservata nei barili diventava maleodorante e di cattivo sapore, in alcuni casi imbevibile.

A parte l'incertezza della distanza dalla destinazione, a volte nemmeno conosciuta, il rischio che il viaggio si allungasse inaspettatamente e quindi di terminare le scorte d'acqua prima di toccare terra, era legato a eventi in precedenza sconosciuti, tipici delle regioni oceaniche equatoriali, come l'assoluta immobilità della nave per totale mancanza di vento che poteva durare settimane o furiose tempeste che potevano far dirottare la nave. Di fronte a questa preoccupazione di comandanti e marinai, ma anche degli armatori, sapere di poter ricavare acqua dolce da quella marina, fece scattare un enorme interesse in dissalatori che potessero essere installati o costruiti a bordo da utilizzare in casi di emergenza, quando fossero finite le scorte di acqua potabile o quella disponibile fosse diventata di cattiva qualità e quindi non utilizzabile dall'equipaggio.

Non risulta che ci fossero impianti di dissalazione nelle prime flotte, come quelle utilizzate nei viaggi di Colombo alla scoperta dell'America o nelle successive spedizioni mercantili come quella di Amerigo Vespucci o di esplorazione e conquista come quelle degli spagnoli Cortéz e Pizarro e del portoghese Cabral, oppure ancora del portoghese Magellano che fece il giro del mondo. Però l'esperienza acquisita



24. Disegno di tipico dissalatore usato a bordo delle navi che intraprendevano viaggi transatlantici (immagine di pubblico dominio).

e le vicissitudini patite in questi primi viaggi transoceanici evidenziarono la necessità di assicurare forme alternative di approvvigionamento di acqua potabile in viaggi di lunga durata. È così che, dalla seconda metà del XVI sec., si iniziano ad avere notizie di imbarcazioni che hanno utilizzato impianti di dissalazione a bordo (fig. 24).

Il primo di cui si ha notizia è l'esploratore francese Jean de Lery che racconta di aver distillato acqua di mare con successo nel 1556 durante il suo viaggio verso il Brasile (Nebbia G. *et al.*, 1966b, p. 137). L'ammiraglio britannico Richard Hawkins (1560-1622), che viaggiò nei mari del sud visitando il Giappone, le Filippine e la Cina, nel 1593 salpò dal porto di Plymouth e nel suo libro del 1622 dal titolo *The Observations of Sir Richard Hawkins, Knt: In His Voyage Into the South Sea in the Year 1593* (Le osservazioni di Sir Richard Hawkins, Knt: Nel suo viaggio nei mari del sud nell'anno 1593) riporta che era stata ottenuta per distillazione acqua potabile che gli aveva permesso di superare la crisi di mancanza idrica dovuta all'impossibilità di trovare un approdo così da poterne dare a sufficienza ai molti marinai ammalati (Nebbia G. *et al.*, 1966b, pp. 141-142).

Pedro Fernandes de Quirós (1565-1615), che scoprì le Nuove Ebridi e le chiamò Australia, racconta che un distillatore di rame fu usato per produrre acqua dolce. Nel suo diario si legge:

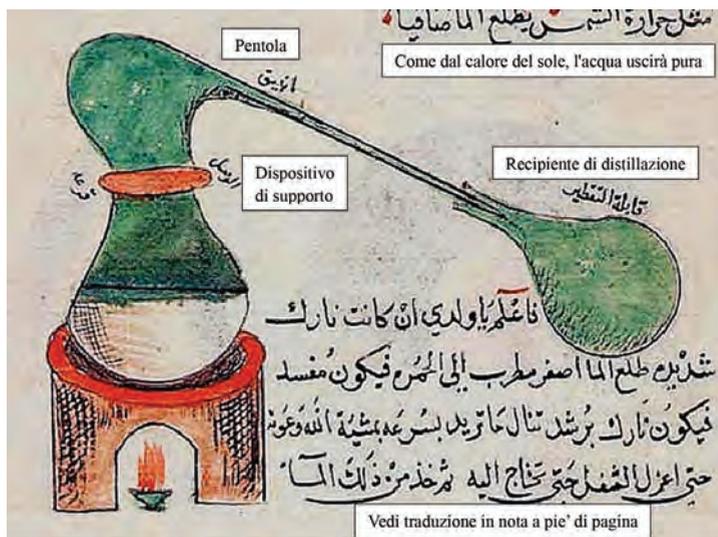
6 febbraio 1606: oggi è stato preparato il focolare e il dispositivo per produrre acqua potabile dal sale.

7 febbraio: si è acceso il fuoco sotto il dispositivo che ha cominciato a produrre acqua dolce con molta facilità. Oggi abbiamo prodotto tre tazze peruviane. L'obiettivo era di provare l'apparato e l'acqua prodotta è stata trovata essere chiara dolce e buona da bere (Nebbia G. *et al.*, 1966b, p. 143) [Trad. d'A.].

Da questo momento, anche se non ci sono documenti specifici che lo confermano, molte navi per viaggi transoceanici debbono aver avuto la possibilità di dissalare l'acqua del mare a bordo in caso di emergenza. Fino al XIX sec. non ci sono produttori di impianti di dissalazione di tipo industriale, cioè standardizzati e ottimizzati riguardo al consumo di combustibile e materiali usati, quindi i dissalatori trovati sulle navi sono tutti diversi l'uno dall'altro, costruiti in modo artigianale a bordo o a terra. Data la scarsa esperienza pratica precedente non sorprende che i primi impianti avessero spesso problemi, e alcuni addirittura non funzionassero.

Tutti i dissalatori funzionavano in modo discontinuo. Si riempiva di acqua di mare il contenitore a forma di alambicco e si continuava a farla bollire e produrre acqua potabile fino a quando rimaneva solo sale. L'efficienza dell'operazione era incredibilmente bassa perché all'inizio si usava il disegno basilare di alambicco degli antichi, consolidatosi nel periodo arabo verso la fine del I° millennio (fig. 25)¹. Con questo tipo di distillatore il vapore condensa sul collettore in cima al bollitore per raffreddamento naturale dell'aria, per cui molto del vapore viene perso prima di essere raccolto come condensato. Questo potrebbe essere ininfluente se ci fosse grande disponibilità di carburante a buon mercato, ma sulle navi tutto è limitato e ottenere più acqua con la stessa quantità di carbone era estremamente importante.

25. Disegno di alambicco del sec. VIII contenuto in un trattato di chimica arabo, che include la poetica e saggia istruzione del maestro a un discepolo del suo uso per purificare l'acqua (da: *1001 Inventions: The Enduring Legacy of Muslim Civilization*, 3rd edition, p. 93).



La letteratura si arricchisce rapidamente di riferimenti al fatto che l'acqua aveva un sapore cattivo, solo la prima prodotta risultava gradevole da bere. Spesso si parla di sapori bituminosi. Questo non sorprende immaginando le condizioni di funzionamento di questi dispositivi, avvolti dal fumo e dalla fuliggine del braciere,

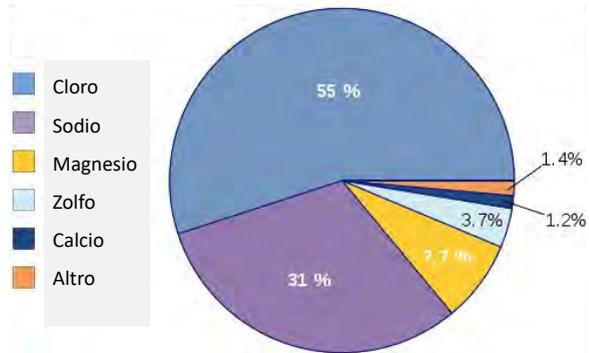
¹ Sappi, figlio mio, che se il tuo fuoco è forte e passa dal giallo al rosso ed è turbolento, questo è dannoso. Rendi il tuo fuoco meno forte e ottieni rapidamente ciò che vuoi con l'aiuto di Dio, in modo da poter conservare l'energia per quando ne avrai bisogno per produrre altra acqua.

usato in cucina e a tavola, per cui è detto appunto sale da cucina. Sono famose le saline della Sicilia e delle sue isole, dove il sale è stato prodotto ininterrottamente dai tempi dei Greci e dei Romani. La produzione avviene facendo evaporare l'acqua del mare in vasche poco profonde esposte al sole. Nella fig. 91 si vede una antica salina nell'isola di Lipari nelle isole Eolie. Il cloruro di sodio si trova anche come roccia e nei supermercati normalmente si trova in vendita dei due tipi.

Va rilevato che il contenuto di sali nell'acqua consumata che assicura la salute è differente per ogni essere vivente. Per esempio, se per gli esseri umani è meglio non superare un TDS di 1.000 mg/L, o al massimo 1.500-2.000 mg/L come consumo giornaliero abituale, un TDS di 7.000 mg/L può andare bene per i cavalli (Bazargan A. *et al.*, pp. 47-48). Non solo, a volte sono le concentrazioni di singoli elementi per cui si hanno diversi livelli di tolleranza: per esempio il livello di boro accettabile nell'acqua potabile per noi esseri umani, come stabilito dalla WHO, è di 2,4 mg/L, ma questo livello è sufficiente per far deperire gli alberi di agrumi, che possono tollerare solo fino a 0,5 mg/L (Bazargan A. *et al.*, 2018, p. 68).

L'acqua dolce prodotta per dissalazione ha normalmente un TDS ben inferiore a 600 mg/L, che è il limite normalmente stabilito per l'acqua dissalata come abbiamo detto qui sopra. Nella dissalazione dell'acqua di mare di solito si produce acqua dolce con TDS di circa 300 o 400 mg/L con l'RO e con TDS fra 10 e 50 mg/L con la distillazione.

L'acqua così prodotta è già potabile, quindi non ci sarebbe necessità di modificare la sua composizione, se non per migliorarne il gusto (cfr. p. 205 per prove effettuate all'Università di Sydney), perché i sali necessari per il corpo umano sono soprattutto acquisiti attraverso l'alimentazione e quelli introdotti con l'acqua sono generalmente di interesse marginale. È possibile avere un'idea quantitativa guardando la fig. 92 dove il cucchiaino contiene 1 g di sale, ossia quello che di solito è il contenuto di alcuni litri di acqua potabile.



90. Distribuzione media percentuale degli ioni principali contenuti nell'acqua del mare (da CC: http://en.wikibooks.org/wiki/High_School_Earth_Science/Introduction_to_Oceans#Composition).



91. Antica salina nell'isola di Lipari nelle isole Eolie (foto dell'autore, 2022).

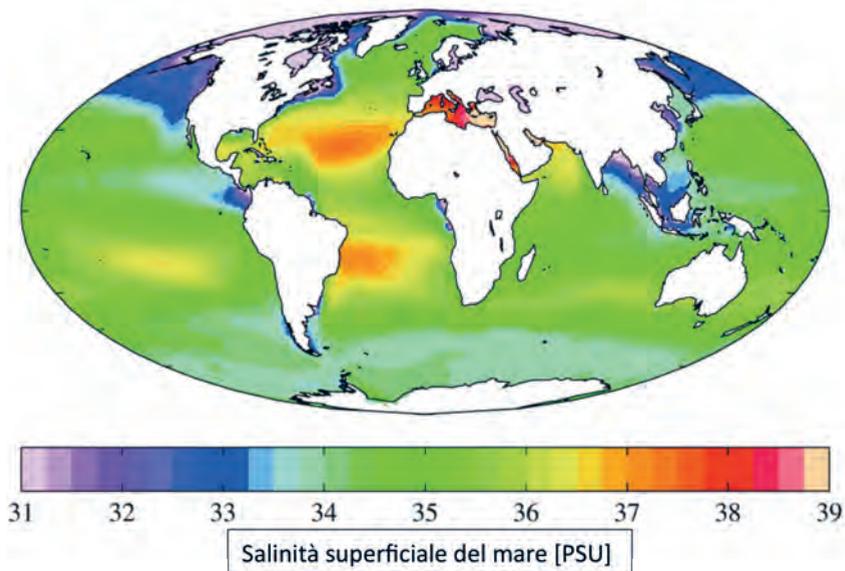
È comunque necessario aggiustare il TDS e la composizione dell'acqua prodotta con la dissalazione per stabilizzarla prima di farla entrare in una rete di distribuzione, questo perché ha un pH basso e è aggressiva per i materiali metallici con i quali entra in contatto. Ciò è fatto con quella che è chiamata rimineralizzazione, che normalmente ha l'obiettivo di aumentare la durezza dell'acqua, il che la rende meno corrosiva (WHO, 2017, pp. 98-99).



92. Cucchiaino contenente 1 g di sale da cucina, ossia cloruro di sodio, che mediamente è quello contenuto in alcuni litri di acqua potabile (foto dell'autore).

Grazie alla capacità dei processi di dissalazione nel rimuovere anche i patogeni, sono considerati dalla WHO come gli unici processi di trattamento dell'acqua per uso potabile che possono essere realizzati in un unico stadio, quello della dissalazione, e nessun altro trattamento posteriore. È comunque necessario introdurre e mantenere un disinfettante nell'acqua dolce prodotta perché mantenga la sue ottime caratteristiche igienico-sanitarie.

Il valore di riferimento del TDS dell'acqua di mare è normalmente di 35.000 mg/L, che è quello medio degli oceani, ma in realtà esiste una grande diversità come si può rilevare nella fig. 93 (Bazargan A. *et al.*, 2018, p. 44), dove nella scala colorata il verde corrisponde a un TDS di 35.000 mg/L, il viola chiaro a acqua praticamente dolce e il rosso a



93. Salinità media annua della superficie del mare (da: *World Ocean Atlas*, 2009).

TDS superiori a 45.000 mg/L². Per esempio, in mari relativamente chiusi come il Mediterraneo o il Golfo Persico il TDS è fra 37.000 mg/L e 40.000 mg/L nel primo e superiore a 45.000 mg/L nel secondo. All'opposto, un altro mare chiuso come il Mar Baltico ha un TDS fra 1.000 mg/L, ossia un valore di acqua potabile, e 8.000 mg/L in quanto riceve grandi quantità di acqua dolce dallo sciogliersi della neve e dei ghiacci. Il TDS del Mar Morto è superiore ai 300.000 mg/L, ossia vicino al limite di solubilità del cloruro di sodio.

Quando si parla della capacità degli impianti di dissalazione, comunemente si parla di metri cubi al giorno, ossia m³/giorno, normalmente indicati come m³/d internazionalmente (da *day*, giorno in inglese).

Se si tratta di impianti di grande capacità si parla di migliaia di m³/giorno. Questo è equivalente a milioni di litri al giorno, ossia mld, o MLD, con il D (*day*) che di nuovo viene dall'inglese, che è un'altra misura frequentemente trovata in letteratura.

Nella letteratura internazionale si usano spesso anche i galloni USA al giorno, ossia USgal/d. Per impianti di grande capacità si parla di milioni di galloni al giorno, ossia mgd o MGD. Il fattore di conversione approssimato con i litri è: 1 gallone US = 3,785 litri.

2. Tecniche della dissalazione dell'era moderna

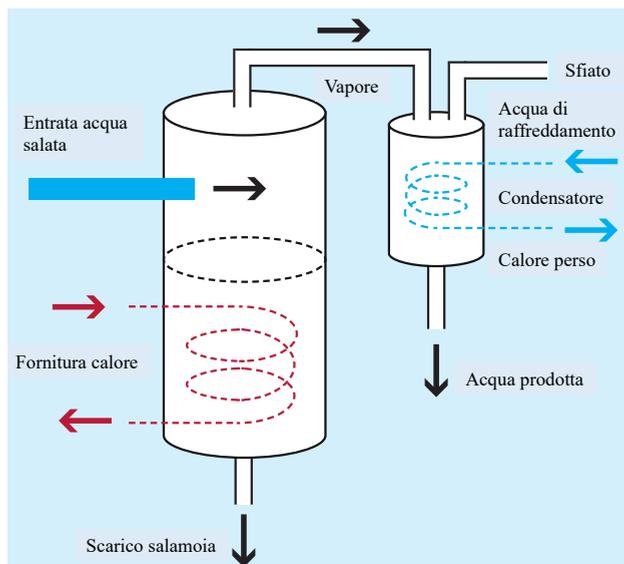
Oggi giorno ci sono molti processi alternativi di dissalazione. Alcuni usano metodi e tecnologie che non erano disponibili o facilmente immaginabili nei secoli passati, per esempio l'elettrodialisi che è basata sull'uso dell'elettricità, e quindi non potrebbe essere stata concepita prima del XIX sec.

Molti dei vari processi scoperti spesso non hanno ancora trovato applicazioni pratiche perché sono ancora allo stadio sperimentale o sono di difficile applicazione o non competitivi, mentre altri hanno trovato la loro utilità per applicazioni specifiche, generalmente non ancora nel campo della produzione di acqua dolce dal mare per il consumo umano su larga scala. Quindi il lettore non deve sorprendersi se in letteratura e nei media incontra il nome di metodi di dissalazione non menzionati in questo libro: si tratta di metodi non ancora *mainstream*, ossia non di ampia applicazione.

I metodi usati più comunemente per dissalare possono essere raggruppati in tre categorie, quelle che abbiamo visto essere già state pensate nell'antichità:

- il metodo termico o evaporativo, basato sulla distillazione;
- la filtrazione attraverso membrane semipermeabili;
- lo scambio ionico.

² In Fig. 93 PSU significa unità pratica di salinità. Anche senza riferirsi alla sua definizione, in pratica la salinità superficiale dei mari varia fra 31 e 38 PSU come indicato nella figura.



94. Semplice apparato per distillare acqua di mare (da: Birkett J.D., 2011b, p. 6).

2.1. Il metodo termico o evaporativo, basato sulla distillazione

Come abbiamo visto dall'antichità è noto che acqua dolce può essere prodotta a partire dall'acqua del mare. Il modo più semplice è usare un recipiente dove farla bollire e un condensatore per condensare il vapore (fig. 94). Per farlo occorre introdurre il calore necessario per scaldare l'acqua e portarla a ebollizione. Una volta che questa bolle dobbiamo continuare a dare calore perché continui a bollire e produrre vapore. La quantità di calore necessario per far evaporare l'acqua è molto maggiore di quello necessario per portare l'acqua a ebollizione ed è proprio questo calore di evaporazione che è perso nell'aria nell'alambicco della tradizione antica o nella corrente di acqua fredda usata per condensare il vapore come si fa normalmente negli ultimi secoli.

Alla fin fine tutto lo sviluppo ulteriore di questo tipo di dissalazione fino a oggi è stato una ricerca di riutilizzare al massimo questo calore di condensazione. È quello che cercheremo di descrivere qui di seguito, ma il lettore che non abbia interesse a scendere nei dettagli né analizzare gli schemi riportati nelle figure non si preoccupi: può limitarsi a scorrere questo paragrafo 2.1. che descrive le due tecnologie evaporative più applicate nella dissalazione moderna, ossia la MED e la distillazione MSF, che abbiamo spesso incontrato nella narrazione, e la VC, che è di uso più limitato.

Esiste anche un sistema semplice per dissalare l'acqua con il calore solare, che replica la dissalazione naturale con cui il sole fa evaporare l'acqua del mare che torna a terra sotto forma di pioggia, fornendo così l'acqua dolce necessaria per la vita. Il funzionamento di questo dissalatore solare non dovrebbe essere difficile da comprendere visto che è lo stesso fenomeno che si verifica quando facciamo la doccia e il vapore che si condensa sullo specchio del bagno si trasforma in goccioline che dopo un po' cominciano a scorrere lungo il vetro.

Distillazione a Multiplo Effetto (MED)

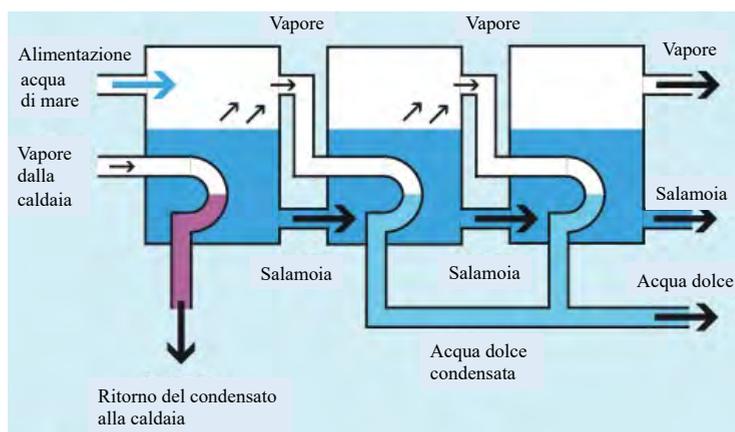
Nella Parte II, par. 1.3, p. 106 si è visto che nella seconda metà del XIX sec. si cominciò a utilizzare il condensatore del vapore prodotto dall'ebollizione dell'acqua come un secondo bollitore dove si recuperava l'energia usata per evaporare l'acqua nella prima unità per far evaporare l'acqua salata una seconda volta condensando appunto il vapore prodotto dalla prima, ottenendo così un dissalatore di doppio effetto.

Per sfruttare questo concetto in modo ancora più efficiente si applicarono le nuove conoscenze sulla dipendenza del punto di ebollizione dell'acqua dalla pressione, ossia si sfruttò la caratteristica che l'acqua bolle a temperatura più bassa quando si abbassa la pressione, come ha sperimentato chiunque abbia fatto bollire l'acqua per cuocere la pasta quando si trova in montagna e la pasta non viene bene perché l'acqua bolle a meno di 100 gradi.

Per dare un'idea dell'entità di questo fenomeno, basta pensare che a 2.000 m di altezza la temperatura di ebollizione dell'acqua è già scesa dai 100 gradi al livello del mare a 93 gradi. Continuando a salire, in vetta al Monte Bianco, che è a 4.800 m, l'acqua bolle a 83,9 gradi. Se si arriva agli 8.850 m dell'Everest la temperatura di ebollizione è già scesa a 71,9 gradi. Ciò vuol dire che non vale la pena provare a cuocere la pasta in cima al Monte Bianco, e tanto meno sull'Everest! D'altra parte, se invece si vuole cuocerla sulle rive del Mar Morto a 430 m sotto il livello del mare, bisogna stare attenti perché con un'acqua che bolle a 101,4 gradi, la pasta può passare rapidamente di cottura.

Sfruttando quindi questo fenomeno fisico si applicò una pressione più bassa nel secondo effetto, il che permise di far evaporare parte dell'acqua da questo contenuta, ossia portarla a ebollizione, solo con il calore ceduto dal vapore nel condensarsi e quindi senza la necessità di aggiungere nuovo calore. Ripetendo il processo, abbassando sempre di più la pressione, si può creare un terzo effetto, poi un quarto e così via, creando quella che è chiamata la distillazione a multiplo effetto, ossia MED dall'inglese *Multiple Effect Distillation*.

Se non ci fossero perdite, in teoria con la stessa quantità di energia un dissalatore a doppio effetto dissalerebbe il doppio della quantità di acqua di un dissalatore a effetto unico, uno a tre effetti tre volte ecc. Evidentemente ci sono perdite e esiste un limite al numero di effetti che è economico realizzare. L'introduzione della MED portò comunque a una tale maggiore efficienza energetica del dissalatore, diminuendo così fortemente il



95. Rappresentazione schematica di un dissalatore di tipo MED a tre effetti (da: Birkett J.D., 2011b, p. 7).

costo della produzione dell'acqua dolce, che fece sì che alla fine del XIX sec. ci fosse un alto incremento dell'uso della dissalazione attraverso impianti di MED. Un distillatore a tre effetti è descritto schematicamente nella fig. 95.

Evaporazione istantanea (flash) a stadi multipli (MSF)

Nella MED l'acqua da dissalare viene fatta bollire dai tubi che l'attraversano, nei quali scorre un fluido molto caldo, che è il vapore originato in una caldaia esterna per il primo effetto e poi il vapore originato nell'effetto precedente per i seguenti effetti. Guardando lo schema della fig. 95 si può anche notare che l'acqua da dissalare e il vapore prodotto si muovono nella stessa direzione lungo il dissalatore, da sinistra a destra, e quindi il vapore di uno stadio successivo è ottenuto e condensato da acqua con concentrazione sempre maggiore di sali. Queste condizioni creano facilmente incrostazioni di sale sulle pareti dei tubi a contatto con l'acqua salata, come quelle che si possono vedere nella fig. 96. Queste incrostazioni sono dello stesso tipo di quelle che si formano sulle superfici metalliche degli elettrodomestici, per esempio il ferro da stiro, se non si riempie di acqua distillata, o nei fori dei soffioni della doccia, che col tempo si tappano per il depositarsi del calcare.

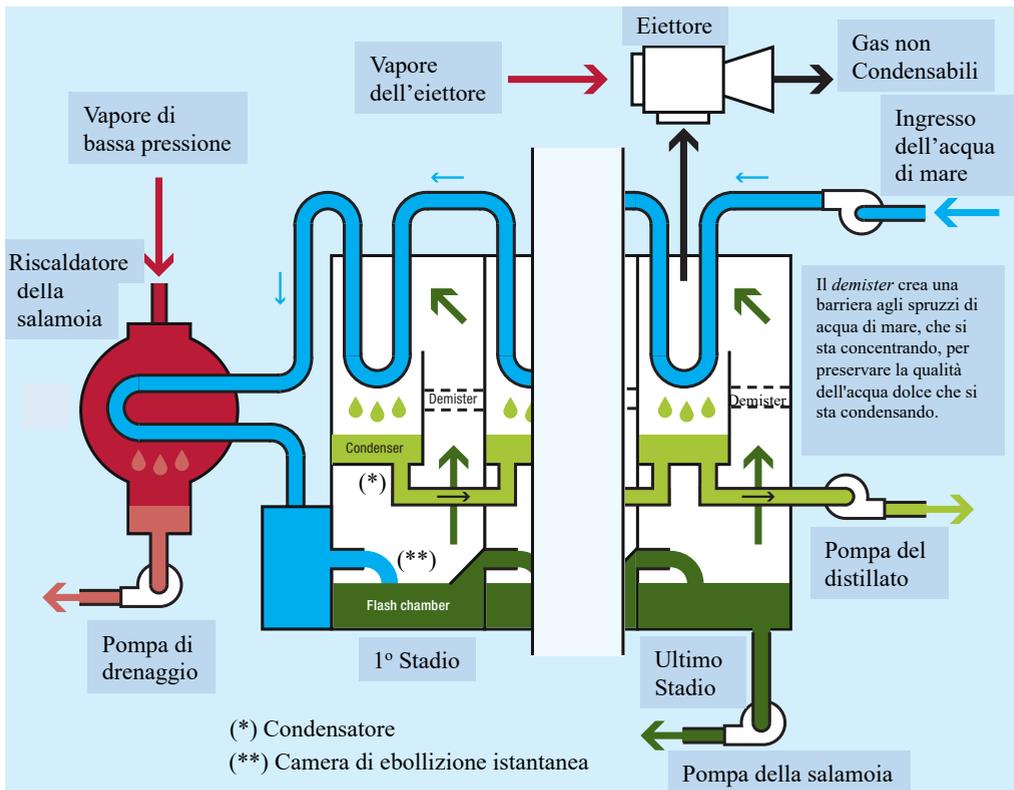
Per tentare di ovviare a questo problema della MED, che comportava serie difficoltà di manutenzione e di perdita di efficienza dell'operazione, dopo la Seconda Guerra Mondiale si introdusse un metodo di distillazione a più stadi alternativo alla MED, simile concettualmente ma dove l'acqua di mare da dissalare va in controcorrente alla direzione del vapore prodotto. In questo metodo alternativo l'acqua da dissalare viene portata all'ebollizione in uno scambiatore di calore riscaldato con vapore prodotto da una caldaia esterna e che opera a pressione ambiente, quindi a 100 gradi. Da qui l'acqua da dissalare entra nel primo stadio a pressione più bassa, il che causa una immediata ed esplosiva ebollizione detta istantanea, ovvero *flash* dall'inglese, anche qui come nella MED senza necessità di aggiungere calore perché l'acqua è già a una temperatura superiore a quella di ebollizione per quella



96. Tipiche incrostazioni saline che si formano sulle pareti dei tubi metallici a contatto con l'acqua salata calda (da: <https://klarenbv.com>).

pressione. Per conseguenza, a differenza della MED, l'ebollizione avviene naturalmente dal corpo di acqua e quindi non comporta problemi di incrostazioni. Per condensare il vapore si usa l'acqua di mare che viene introdotta nell'impianto per essere dissalata, quindi ancora lontana dalla temperatura di ebollizione e con la salinità costante originaria, che sono condizioni in cui è molto meno probabile che si creino incrostazioni calcaree sulla superficie metallica del tubo attraversato dal vapore che non nella MED.

Per aumentare l'efficienza del processo e recuperare il calore di condensazione, anche in questo caso, come con la MED, si crea una successione di stadi. Infatti dalla prima camera a pressione ambiente si passa a una nuova a pressione più bassa, e così via con stadi a pressioni decrescenti, dove quindi l'acqua bolle a temperature sempre più basse, fino a raggiungere



97. Rappresentazione schematica di un dissalatore di tipo MSF (da: Birkett J.D., 2011b, p. 10).

condizioni quasi di vuoto, ossia di pressione nulla. Il calore di evaporazione è recuperato facendolo assorbire dall'acqua da dissalare, che entra nell'impianto a temperatura ambiente e condensa il vapore nell'ultimo stadio, che ha pressione e temperatura minori di tutti gli altri stadi. L'acqua marina prosegue poi di stadio in stadio riscaldandosi mentre condensa vapore, fino ad arrivare in uno scambiatore di calore a vapore dove, come si è detto, è portata a ebollizione da un'ultima aggiunta di calore esterna.

Questo metodo si chiama distillazione o evaporazione istantanea a stadi multipli, ovvero *Multi-Stage Flash distillation* o *evaporation* in inglese, da cui viene l'acronimo con cui è normalmente conosciuta, MSF. Una rappresentazione schematica dell'MSF è riportata in fig. 97, dove è anche indicato il metodo con cui normalmente si crea il vuoto, ossia una pressione bassissima. Sono dei cosiddetti eiettori attraverso i quali passa vapore a alta pressione che creano il vuoto assorbendo l'aria contenuta nel dissalatore sfruttando il fenomeno conosciuto come effetto Venturi.

Qualche lettore avrà già pensato: e lo scambiatore di calore finale dell'MSF, che è riscaldato con vapore surriscaldato appositamente generato che percorre tubi metallici, non si incrosta come nel primo e i successivi effetti della MED? È proprio così: il vantaggio è che in questo metodo c'è solo un apparecchio esterno con seri problemi di incrostazioni,