

Energia da gradienti salini dalle correnti salate l'energia del futuro

di Alessandro Tamburini

Oggigiorno molte ricerche e studi sono orientati a trovare fonti energetiche rinnovabili alternative a quelle convenzionali e tecnologie efficienti in grado di sfruttarle. L'energia da gradienti salini è una fonte di energia rinnovabile non convenzionale largamente disponibile e al momento poco sfruttata. Questa energia risulta disponibile ogni qualvolta si portano a contatto due correnti acquose a diversa salinità, così come accade naturalmente ogni giorno quando un fiume sfocia a mare. Ad oggi esistono diverse tecnologie in grado di convertire questa energia chimica in corrente elettrica: la Pressure Retarded Osmosis, PRO (Osmosi Ritardata da Pressione) e la Reverse Electrodialysis, RED (Elettrodialisi Inversa) sono sicuramente le più promettenti.

Nel caso della RED è stato recentemente realizzato e testato presso le saline Ettore e Infersa di Marsala (TP) un impiantino pilota della capacità di 1kW in grado di operare con gradienti salini non convenzionali.

Recentemente, all'interno della prestigiosa rivista scientifica Nature è stato proposto di utilizzare le suddette tecnologie unitamente ad una seconda apparecchiatura in grado di ri-smiscelare le due soluzioni saline attraverso l'utilizzo di calore di scarto, ristabilendo così il gradiente salino iniziale da inviare all'unità PRO o RED. Questa è l'idea innovativa del motore termico a gradiente salino.

1 Introduzione

Energia, Acqua, Cibo e Salute sono le 4 sfide del XXI secolo che possono essere affrontate con successo solo attraverso un approccio di assoluta sostenibilità in ambito economico, ambientale e sociale. È proprio in quest'ottica che si stanno sviluppando approcci di economia circolare parallelamente a processi nuovi e/o già esistenti e ricerche verso nuove fonti di approvvigionamento idrico-energetico. All'interno di questo contesto si inserisce perfettamente la crescente attenzione verso una delle fonti rinnovabili più abbondanti presenti sul globo: l'acqua di mare. Il 71% del globo terrestre è infatti ricoperto di acqua, di cui solo il 3% è dolce: di questa, il 2,1% è intrappolata nelle calotte polari e solo lo 0,65% è acqua dolce utilizzabile sotto forma di laghi, fiumi e falde sotterranee. Il restante 97% è acqua salata, una risorsa tanto grande quanto sotto-utilizzata. Dall'acqua di mare è possibile estrarre (i) acqua dolce mediante tecniche di dissalazione, (ii) cloruro di sodio come avviene naturalmente nelle saline, (iii) materie prime ad altissimo valore aggiunto come il litio e il magnesio e infine (iv) energia.

Diversi studi indicano infatti come sia necessario diversificare l'approvvigionamento di energie rinnovabili per un futuro sostenibile. Oltre alla più nota energia da correnti marine, maree e moto ondoso, l'acqua di mare rappresenta la fonte di un'altra energia rinnovabile molto meno nota: l'energia da gradienti salini.

2 L'energia da gradienti salini

L'energia da gradienti salini, come dice la parola stessa, risulta disponibile ogni qualvolta siamo in presenza di un gradiente salino, ossia di due diverse soluzioni saline a contatto a diversa concentrazione di sale. Questa energia è rappresentata dall'energia libera di miscelamento delle due soluzioni, ossia dalla differenza energetica tra uno stato iniziale in cui le due soluzioni sono separate e quello finale in cui si trovano miscelate. In altre parole, con riferimento alla figura

seguinte (Fig.1) si vede subito come alla messa a contatto di due soluzioni saline a diversa concentrazione di sale (i.e. gradiente salino) corrisponda una certa aliquota di energia utilizzabile; questa si va via via dissipando man mano che il processo di miscelazione avviene sino ad esaurirsi del tutto quando si è raggiunta l'omogeneità di distribuzione del sale disciolto (i.e. concentrazione salina uguale in tutti i punti del sistema). Risulta quindi ovvio immaginare quanta energia si dissipi ogni giorno sulla nostra terra, ad esempio quando, alla foce di un fiume, questo raggiunge il mare.

Solo per dare un'idea di quanta energia è in gioco, si può immaginare di miscelare 1m³ di acqua di fiume con la stessa quantità di acqua di mare; da questa miscelazione si può idealmente ottenere circa 0.5 kWh di energia ossia la stessa energia necessaria a fare funzionare un elettrodomestico che consuma 500 Watt per un'ora. Se addirittura si miscelasse 1m³ di acqua di fiume con la stessa quantità di una salamoia di salina (cioè la soluzione molto concentrata dal quale si fa precipitare il sale da cucina che noi tutti mangiamo) si potrebbero ottenere circa 5kWh di energia, ossia un'energia 10 volte più grande.

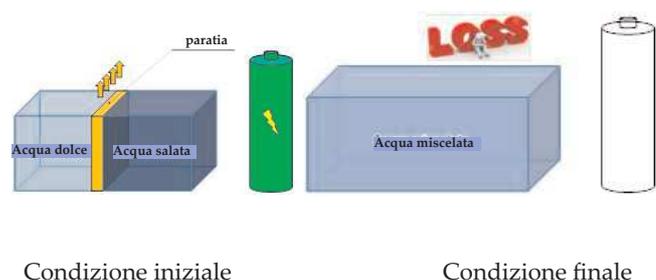


Fig.1 Rappresentazione schematica dell'energia da gradienti salini.

3 Le tecnologie

La domanda sorge dunque spontanea. E' possibile recuperare o sfruttare in qualche modo questa energia che perdiamo ogni giorno? La soluzione è rappresentata dal processo di "miscelazione controllata" ossia dal mettere in campo delle metodiche che permettano di sfruttare a proprio vantaggio la miscelazione delle due soluzioni che avviene spontaneamente. Questa miscelazione controllata può essere garantita dall'utilizzo di opportuni dispositivi come speciali membrane o elettrodi o altro. A seconda del tipo di dispositivo adottato si hanno diverse tecnologie possibili.

Tra queste tecnologie, quelle che hanno raggiunto il Technological Readyness Level (TRL) più alto, ossia quelle che sono più vicine allo sviluppo industriale su larga scala sono la Pressure Retarded Osmosis (PRO) (i.e. Osmosi ritardata da Pressione) e la Reverse Electrodialysis (RED) (Elettrodialisi Inversa). Tanto per uscire dal vago e capire meglio che relazione sussiste tra fonte rinnovabile e tecnologia, si può pensare, ad esempio, che la RED sta all'energia da gradienti salini come il fotovoltaico sta all'energia solare.

3.1 Pressure Retarded Osmosis (PRO)

La PRO prevede l'impiego di membrane osmotiche semipermeabili che consentono idealmente il passaggio solo dell'acqua bloccando quello dei sali. Un'unità PRO è provvista di 2 canali (l'uno per la soluzione diluita, l'altro per quella concentrata) separati dalla membrana (Figura 2). La differenza rispetto ad un processo di osmosi diretta convenzionale è che qui il canale contenente la soluzione concentrata viene messo in pressione (ad un valore di pressione che risulti inferiore alla differenza di pressione osmotica tra i due canali). Questo garantisce comunque un flusso di acqua dal canale diluito al concentrato, ma che risulta ridotto, diciamo "ritardato", per effetto della pressione applicata: da qui deriva il nome di Osmosi Ritardata da Pressione. Il flusso d'acqua che attraversa la membrana osmotica in queste condizioni si trova, una volta giunto nel canale concentrato, ad una pressione più alta. Un ingegnere sa bene che il prodotto di questa quantità di acqua che ha attraversato la membrana per la pressione è una energia di pressione (o energia meccanica). Più semplicemente, l'utilizzo intelligente di una membrana osmotica consente di trasformare l'energia da gradiente salino in energia di pressione ossia in quella stessa forma di energia che troviamo nell'idroelettrico. In altre parole, è come se l'utilizzo della membrana avesse consentito di portare una certa quantità di liquido ad una certa altezza in modo gratuito. L'energia di pressione viene poi convertita in energia elettrica attraverso l'uso di una turbina, proprio come accade in una centrale idroelettrica. Sembrerebbe qualcosa di molto complesso e molto lontano dalla nostra realtà quotidiana, ma in realtà non è così. Si immagina che se la pressione applicata sul canale concentrato fosse molto alta (maggiore della differenza di pressione osmotica) l'acqua fluirebbe nel verso opposto, ossia dal comparto concentrato a quello diluito. Si tratta del

processo opposto, noto come Osmosi Inversa che rappresenta la tecnologia ad oggi più usata dagli impianti di dissalazione (incluso quello di Ustica) e dagli osmotizzatori che troviamo sotto i nostri lavandini per produrre acqua potabile.

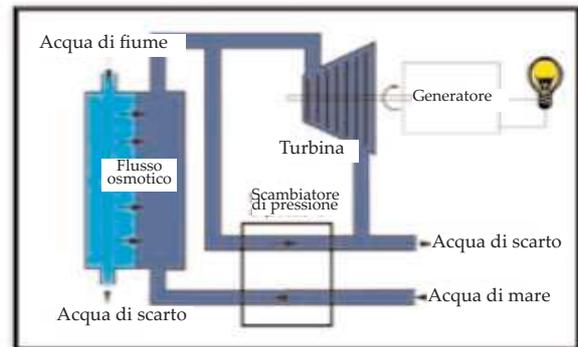


Fig.2 Schema di funzionamento della Pressure Retarded Osmosis (PRO).

La PRO presenta numerosi vantaggi tra cui la semplicità. È inoltre potenzialmente in grado di produrre grandi quantità di energia. Tra gli svantaggi invece troviamo: (i) la presenza di parti meccaniche come la turbina, (ii) la conversione non diretta dell'energia da gradiente salino in energia elettrica in quanto è necessaria una preliminare trasformazione in energia meccanica con conseguente riduzione dell'efficienza complessiva e (iii) infine l'assenza nel mercato di unità e membrane in grado di lavorare sotto le forti pressioni richieste.

3.2 Reverse Electrodialysis (RED)

Anche l'elettrodialisi inversa, così come la PRO, prevede l'ausilio di membrane, ma in questo caso si tratta di membrane a scambio ionico (Figura 3). Più precisamente, l'unità contiene due tipi di membrane a scambio ionico, ossia membrane a scambio cationico (CEM) che consentono il passaggio solo degli ioni positivi di cui è composto il sale (cationi) e membrane a scambio anionico (AEM) che invece permettono il passaggio ai soli ioni negativi (anioni). All'interno di uno stack (cioè unità) RED le membrane a scambio anionico e cationico sono disposte in modo alternato intervallate da canali dove fluiscono le soluzioni concentrate e diluite, anche queste introdotte in modo alternato. Si avrà quindi, come mostrato in figura, una membrana a scambio cationico seguita dal canale della soluzione concentrata, seguito dalla membrana a scambio anionico, seguita dal canale della soluzione diluita e così via. Il sale tenderà a spostarsi dal canale concentrato ai due canali diluiti adiacenti, ma potrà farlo solo in modo controllato. Il sale è infatti costituito da una parte positiva (ione positivo o catione) e una parte negativa (ione negativo o anione), quindi grazie alla disposizione delle membrane, gli ioni positivi potranno fluire solo attraverso la membrana cationica, mentre quelli negativi si muoveranno in direzione opposta attraversando la membrana anionica. Questa miscelazione controllata avviene lungo tutta l'unità RED fino ai comparti finali chiamati comparti elettrodi. Una volta chiuso il circuito elettrico su un

carico esterno, qui il flusso ionico viene convertito in un flusso di elettroni da opportune reazioni di ossidazione.

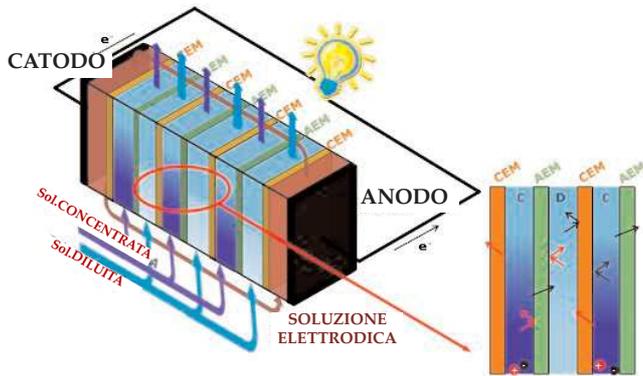


Fig.3 Schema di funzionamento della Reverse Electrodialysis (RED).

La RED è un processo proposto negli anni '50 in grado di convertire direttamente l'energia da gradienti salini in energia elettrica senza nessuna trasformazione intermedia. Non presenta inoltre parti meccaniche in movimento e non ha alcun impatto ambientale.

L'unità ripetitiva di ogni stack RED è il cell pair che risulta costituito da un canale concentrato, un canale diluito, una membrana cationica e una anionica. È possibile calcolare il potenziale elettrico che si genera a cavallo di ciascun cell pair: questo potenziale risulta legato al rapporto tra le concentrazioni saline delle due soluzioni. Il potenziale complessivo dell'intera unità è quindi dato da questo potenziale del cell pair moltiplicato per il numero di cell pair presenti nella nostra unità. Chiaramente questo numero può cambiare a seconda che si tratti di un'apparecchiatura di laboratorio (circa 10-30 cell pair) o di una industriale (500-1000 cell pair). Naturalmente l'efficienza del dispositivo dipende dalla bontà delle membrane ivi contenute: maggiore è la selettività verso gli ioni desiderati a discapito di altri ioni e dell'acqua, maggiori sono le prestazioni delle membrane. Ragion per cui oggi il mercato e la ricerca sulle membrane è in continuo sviluppo. Un altro fattore limitante è legato alla resistenza elettrica dell'unità stessa: ciascuno dei suoi componenti può essere più o meno conduttivo, cioè in grado di opporsi in modo più o meno marcato al passaggio di corrente.

3.2.1 Il progetto REAPower e il prototipo delle saline

Nel caso di gradienti salini convenzionali, ossia quelli che sussistono tra acqua di mare e acqua di fiume, la resistenza elettrica del canale diluito è spesso il fattore determinante tra quelli descritti. L'acqua di fiume è infatti poco conduttiva proprio perché caratterizzata da un basso livello di concentrazione salina. È per questo nato nel 2010 il progetto europeo del 7° Programma Quadro REAPower [1] ossia "Reverse Electrodialysis for Alternative Power production" che ha immaginato l'ausilio di una coppia di soluzioni differenti da miscelare ossia di un gradiente salino non

convenzionale. L'idea iniziale era infatti di utilizzare salamoia di salina nel comparto concentrato e acqua di mare nel diluito in modo da avere una bassa resistenza elettrica in tutti i canali dello stack. Il lavoro di modellazione svolto nell'ambito del progetto ha consentito di scoprire che in realtà la coppia di soluzioni più performanti è costituita da salamoia di salina nel canale concentrato e acqua salmastra (è come un'acqua di fiume più concentrata) nel canale diluito. Il lavoro svolto in sinergia dai vari partner del progetto (tra i quali si cita la Fujifilm responsabile della creazione di membrane in grado di operare in tali condizioni di alta salinità), ha permesso la realizzazione di un prototipo che è stato installato presso le saline Ettore & Infersa di Marsala (Trapani) nel 2014. Si trattava infatti di un sito ideale grazie all'ampia disponibilità di varie soluzioni saline come la salamoia, l'acqua di mare e l'acqua salmastra. L'impianto prototipo era costituito da tre unità RED con un'area complessiva di membrana di circa 218 m² ed è stato in grado di produrre circa 1kW di potenza. È importante notare che questa installazione ha rappresentato il primo prototipo al mondo in grado di operare in queste condizioni. Il successo raggiunto da questo progetto ha suscitato l'interesse di varie testate giornalistiche e redazioni sino ad arrivare a quella di Super Quark che ha girato un servizio andato in onda il 3 Agosto 2016 su RAI 1.

Da quanto riportato sinora si può facilmente desumere che le tecnologie a gradiente salino non devono necessariamente operare con acqua di mare e acqua di fiume, è essenziale avere soluzioni a diversa concentrazione salina ossia il gradiente, ma non risulta necessario che questo sia disponibile in un bacino naturale. Esistono infatti diverse attività antropiche e/o industriali che producono come scarto soluzioni a diversa salinità che potrebbero essere sfruttate per generare corrente elettrica. Un esempio, presente anche nell'isola di Ustica, è rappresentato dalla salamoia in uscita dagli impianti di dissalazione: questi infatti partendo da acqua di mare producono acqua potabile da un lato e uno scarto concentrato (la salamoia appunto) dall'altro. Questa soluzione concentrata potrebbe essere messa a contatto con del refluo urbano già trattato da un impianto di depurazione. La produzione di corrente elettrica potrebbe essere impiegata per ridurre i consumi energetici dell'impianto di dissalazione con una conseguente riduzione del costo dell'acqua dissalata per la comunità. Inoltre, questo accoppiamento presenta, oltre alla produzione di corrente elettrica, ulteriori vantaggi: (i) la salamoia del dissalatore va diluita prima di essere scaricata a mare e questo processo di diluizione avverrebbe già parzialmente nell'unità RED o PRO; (ii) la carica batterica residua presente all'interno del refluo trattato verrebbe, almeno parzialmente, abbattuta dalla salinità della salamoia, è infatti risaputo che molte specie batteriche non sopravvivono alle elevate salinità.

Quindi nell'ottica della crescente attenzione alla circolarità e alla sostenibilità, le tecnologie a gradiente salino potrebbero dare un importante contributo.

4 Il motore termico a gradienti salini

In relazione a quanto detto sinora, emerge chiaramente un limite geografico al processo che risulta attuabile solo in prossimità di gradienti salini naturali o artificiali (vedi dissalatore o impianto di depurazione). In realtà all'interno della prestigiosa rivista scientifica *Nature* è stato recentemente proposto di operare le tecnologie PRO e RED con gradienti salini artificiali accoppiandole con un'unità di rigenerazione del gradiente in un ciclo chiuso di funzionamento che va sotto il nome di motore termico a gradienti salini. Il principio di funzionamento è abbastanza semplice ed è illustrato in figura 4 per il caso della RED. In pratica, l'unità PRO o RED produce corrente elettrica miscelando in modo controllato due soluzioni saline; queste, una volta uscite dall'unità, possono essere inviate ad una seconda apparecchiatura che le smiscela ristabilendo il gradiente salino iniziale. Chiaramente se dalla miscelazione si può ricavare energia, per smiscelare occorre fornire energia che nel motore termico viene fornita sotto forma di calore. Il calore utilizzato è un calore a bassa temperatura (sotto i 100°C) che viene comunemente chiamato calore di scarto. Il nome deriva dal fatto che non esistono ad oggi tecnologie disponibili in grado di convertire efficacemente questo calore in corrente elettrica. Questo calore può avere un'origine rinnovabile (calore solare o geotermico) o provenire da attività industriali. Tale calore infatti è estremamente presente in industria e oltre ad essere inutilizzabile è spesso addirittura un costo per le aziende che si trovano costrette a raffreddare le correnti calde prima di scaricarle in un corpo idrico ricettore.

Il motore termico a gradiente salino nei prossimi anni potrebbe prefigurarsi come la prima tecnologia in grado di effettuare una efficiente conversione di questo calore in corrente elettrica.

In sintesi, il motore termico a gradienti salini è un ciclo chiuso, in cui l'unica cosa che entra è calore di scarto, mentre l'unica uscita è data dalla corrente elettrica. La natura chiusa del ciclo presenta l'intrinseco vantaggio di non essere vincolata all'uso di acqua e cloruro di sodio come coppia soluto-solvente: lo scopo di recenti studi di ricerca è infatti quello di trovare la coppia in grado di massimizzare l'efficienza energetica del ciclo, ossia il rapporto tra la potenza elettrica prodotta e quella termica necessaria al funzionamento, o più semplicemente il rapporto tra la elettricità che produciamo e il calore che ci serve per produrla.



Fig.4. Schema di funzionamento del motore termico ad elettrodialisi inversa (Reverse Electrodialysis Heat Engine, REDHE).

I motori termici a gradiente salino possono essere classificati o in base all'unità di produzione di energia o in base all'unità di rigenerazione. Secondo la prima classificazione, a seconda che si usi la PRO o la RED si avrà rispettivamente l'Osmotic Heat Engine, OHE (Motore termico osmotico) o il Reverse Electrodialysis Heat Engine, REDHE (Motore termico ad elettrodialisi inversa). Al contrario più complessa risulta la classificazione che fa riferimento all'unità di rigenerazione. Sono infatti possibili 2 schemi: uno mirato al recupero del liquido (solvente), l'altro al recupero del sale disciolto (soluto). Nel caso del recupero del solvente, l'unità di rigenerazione può essere rappresentata da qualunque tecnologia di dissalazione termica, mentre per recuperare il soluto una possibilità promettente è rappresentata dall'utilizzo dei sali termolitici, ossia sali come il bicarbonato di ammonio in grado di decomporsi a basse temperature (circa 50°C per il bicarbonato di ammonio) da sali disciolti in sostanze gassose. Una volta degradati si possono separare con facilità dalla soluzione diluita e fatti riassorbire (previo raffreddamento) nella soluzione concentrata. Tutti questi campi di indagine che spaziano dalla coppia soluto-solvente alla tecnologia di rigenerazione più idonea sono oggetto di studio del progetto europeo del Programma Horizon2020 RED Heat-to-Power (Conversion of Low Grade Heat to Power through closed loop Reverse Electro-Dialysis) [2], iniziato a maggio del 2015 e tuttora in corso (fine prevista per il 30/04/2019). Ad oggi, nell'ambito di questo progetto è stato realizzato un piccolo prototipo di laboratorio in grado di operare con soluzioni di bicarbonato di ammonio. Si tratta del primo esempio mondiale di macchina termica in grado di trasformare calore di scarto in una risorsa utile come la corrente elettrica.

5 Conclusioni

L'energia da gradienti salini tuttora poco conosciuta potrebbe rappresentare in futuro una valida aggiunta al ventaglio di fonti rinnovabili disponibili con l'intrinseco vantaggio di non presentare alcun problema di discontinuità temporale di disponibilità. Trattandosi di una fonte rinnovabile innovativa, le tecnologie ad oggi proposte per recuperarla o operando a ciclo aperto (e.g. RED/PRO) o a ciclo chiuso (motore termico) sono ancora in fase di sviluppo. Seppure i primi prototipi sono già stati realizzati, ci vorranno molti anni e il raggiungimento di un'economia di scala per vedere un massivo impiego di queste tecnologie e quindi un beneficio diretto per le comunità. Ovviamente gli studi svolti sono ancora in corso, ed è speranza di tutti che l'energia da gradienti salini possa rappresentare parte integrante del tessuto energetico mondiale dei prossimi 30 anni.

ALESSANDRO TAMBURINI

L'autore è Ingegnere Chimico presso il Dipartimento dell'Innovazione Industriale e Digitale (DIID), Università degli Studi di Palermo.

BIBLIOGRAFIA

1. REAPower project (Reverse electrodialysis alternative power production), FP7-ENERGY-2010-FET, project number: 256736. <http://www.reapower.eu>.
2. RED Heat-to-Power project (Conversion of Low Grade Heat to Power through closed loop Reverse Electro-Dialysis)-Horizon 2020 programme, Grant Agreement n. 640667 (www.red-heat-to-power.eu).