

65° CONGRESSO NAZIONALE ATI

DISSALAZIONE DA FONTE EOLICA IN SICILIA: ANALISI ECONOMICA

Autori: Marco Beccali¹, Josè Massimiliano Galletto^{*1}
Email: * galletto@dream.unipa.it

¹Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM), Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Palermo Viale delle scienze, Edificio 9, 90128 Palermo

SOMMARIO

In questo lavoro verranno descritti i possibili vantaggi derivanti dall'accoppiamento dell'eolico (on shore e offshore) con impianti di dissalazione ad osmosi inversa. In particolare verrà valutata la convenienza economica derivante dall'uso di energia anemoelettrica per la produzione di acqua dissalata da impianti di dissalazione ad Osmosi Inversa. Per effettuare le valutazioni economiche è stato necessario effettuare uno screening economico in letteratura e un'analisi di un impianto ad osmosi inversa, realizzato recentemente in provincia di Agrigento, da cui sono scaturite le scelte sui principali parametri che intervengono nella stima.

INTRODUZIONE

La possibilità di coniugare le due tecnologie, eolico e dissalazione, rappresenta una interessante opzione in merito alle problematiche di gestione della rete elettrica tipiche di sistemi ad alta penetrazione eolica.

L'analisi di seguito svolta è mirata a valutare le prestazioni, in termini economici, che sistemi *wind driven – desalination* produrrebbero in simili scenari.

La possibilità infatti che una parte dell'energia elettrica da fonte eolica disponibile non venga spacciata per mantenere in condizioni di sicurezza la rete elettrica (cosiddetto *wind curtailment*) potrebbe far perdere di attrattività il settore rinnovabile ed in particolare quello eolico. Ovviamente a ciò si potrebbe sopperire, in parte, con l'utilizzo di strumenti di previsione della producibilità (ad esempio le reti neurali), o con interventi infrastrutturali nei sistemi di potenza o con l'adozione di impianti convenzionali più flessibili (e quindi la sostituzione e/o l'ammodernamento di impianti di produzione termoelettrica) o ancora con sistemi di stoccaggio energetico.

Gli scarsi eventi meteorici, conseguenti al particolare regime meteo climatico dell'isola, producono delle condizioni di scarso approvvigionamento idrico.

In considerazione di ciò e delle scelte effettuate nell'ambito

delle gestione delle risorse idriche in Sicilia si è voluto valutare quali benefici potrebbero trarsi dalla sinergia dei due comparti. Recentemente infatti è stato realizzato presso Porto Empedocle, in provincia di Agrigento, un dissalatore ad osmosi inversa della capacità nominale di 100 l/s, per sopperire alle difficoltà di approvvigionamento idrico dell'area. La possibilità di esaminare un impianto siffatto e di conoscerne le caratteristiche, (costi e modalità operative), ha condotto alla elaborazione di un ipotesi di sistema che utilizza l'energia proveniente da wind farm per la dissalazione e di svolgerne una analisi economica prendendo come parametro di riferimento il costo di produzione dell'acqua (*Levelized Cost*).

Le recenti migliorie tecnologiche, soprattutto per quanto riguarda le membrane e i sistemi di recupero dell'energia, di impianti ad Osmosi Inversa ne rendono oramai comparabili le prestazioni e i costi con le tecniche di dissalazione basate sull'utilizzo di energia termica (in testa la Multi Stage Flash).

L'idea di base è quella di remunerare le possibili aliquote derivanti da *curtailment* di impianti eolici al prezzo di produzione (che dipende principalmente dal costo della tecnologia e dalla risorsa disponibile) e valutare quali economie è possibile ottenere nella dissalazione con Osmosi Inversa. La valutazione così come effettuata ha un duplice

effetto: evidenziare i risultati in termini di *Levelized cost* dell'acqua dissalata e individuare quali aree della Sicilia e a quali costi della tecnologia eolica tale applicazione risulta conveniente.

Per effettuare le valutazioni economiche è stato necessario effettuare uno screening economico in letteratura e un'analisi accurata dell'impianto di Porto Empedocle da cui sono scaturite le scelte sui principali parametri che intervengono nella stima.

La natura modulare, la semplicità impiantistica e la flessibilità operativa rendono attraenti le ipotesi di utilizzo dei sistemi ad osmosi inversa nelle operazioni di network management in coerenza anche con la possibilità di integrazione con gli strumenti di previsione della produzione anemoelettrica con reti neurali e le tecniche di gestione elettrolitica dei sistemi di potenza (cui l'acqua rappresenta un input).

Il parametro di confronto nella valutazione finale è rappresentato dal prezzo di vendita dell'acqua in Sicilia. Per tale motivo è stato necessario effettuare un'analisi dei prezzi applicati dalle maggiori aziende del settore.

L'analisi economica è stata differenziata in due sottocasi: on shore e off shore e mostra che in talune condizioni (in funzione della taglia dell'impianto di dissalazione, del capacity factor e del costo della tecnologia eolica) le sinergie fra i due comparti possono produrre delle economie piuttosto consistenti.

STATO DELL'ARTE DELLA DISSALAZIONE

Negli ultimi anni si è assistito ad un forte incremento della produzione di acqua dissalata: nel periodo 1996-2000, a livello mondiale, si è avuto un aumento di circa il 25% della produzione.

Il processo di dissalazione richiede energia termica, meccanica ed elettrica (o la combinazione di esse) per l'ottenimento di acqua dolce dall'acqua salata (generalmente acqua marina). Tale energia rappresenta circa il 35-55% del costo complessivo dell'acqua ottenuta.

Complessivamente i processi che utilizzano la fonte energetica termica sono attualmente quelli numericamente più rilevanti sul totale dal punto di vista della capacità di dissalazione giornaliera in m³.

In particolar modo la tecnologia Multi-Stage Flash (MSF-distillazione o evaporazione a stadi multipli) rappresenta ancora il riferimento fondamentale, specialmente per impianti di capacità elevata.

I più recenti progressi sia tecnologici che progettuali sembrano aver rinforzato alcuni percorsi alternativi che dovrebbero rendere economicamente e tecnicamente fattibile (specialmente per gli impianti di dimensione medio piccola) il passaggio verso l'osmosi inversa (OI).

Infatti per il processo ad osmosi inversa sono oggi disponibili membrane in grado di diminuire significativamente il numero delle fasi necessarie ad ottenere acqua di qualità soddisfacente (anche considerando elevate concentrazioni saline di partenza) senza sacrificarne aspetti di affidabilità e di efficienza energetica.

In tutto il mondo esistono grandi impianti di dissalazione basati su processi e tecnologie consolidate che hanno raggiunto la piena maturità applicativa, affiancati da tecnologie innovative ancora in fase di sperimentazione. Lo

sviluppo delle tecnologie ha consentito di realizzare impianti di dissalazione che hanno una produzione di oltre 100.000 m³/giorno e con costi di produzione anche di 0,50 €/m³ d'acqua prodotta.

Facendo riferimento a Fritzmam [1], troviamo che il consumo energetico dei grandi impianti ad osmosi inversa per la produzione di acqua dolce da acqua di mare, varia dai 0,4 ai 7 kWh/m³ di acqua prodotta.

Per gli impianti di recente realizzazione il consumo energetico si attesta in media sui 4-5 kWh/m³, ma con la tecnologia attuale è già possibile scendere a 3 kWh/m³ e si prevede un'ulteriore riduzione nei prossimi anni fino al valore di 2 kWh/m³.

Sempre Fritzmam in [1] propone (figura 1) un confronto fra le capacità degli impianti di dissalazione (superiori a 700 m³/g) nei Paesi Europei ed una ripartizione per tipologia di impianto che vede in testa l'OI (figura 2).

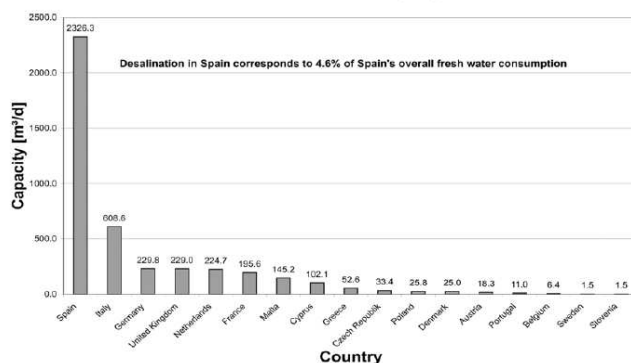


Figura 1 – Capacità degli impianti di dissalazione nei Paesi Europei [1]

La Spagna, nell'area Europea, è la nazione con maggiore presenza di impianti di dissalazione con applicazioni osmosi inversa –eolico nelle isole Canarie [2] mentre in Italia la maggior parte degli impianti è di tipo termico (accoppiati per lo più ad impianti di produzione di energia elettrica o raffinerie) e poche le realtà ad osmosi inversa (si veda in seguito l'impianto di Porto Empedocle in provincia di Agrigento).

Il tipo di impianto con relativa tecnologia e la fonte energetica di base costituiscono i punti critici di maggiore rilevanza tecnico-economica. I costi del capitale investito, la somma dei costi energetici e di quelli di gestione dell'impianto variano, a seconda della struttura, tra il 70 al 90% del costo totale dell'acqua prodotta.

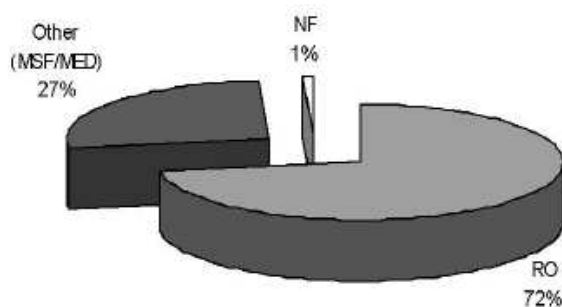


Figura 2 – Ripartizione per tipo di impianto nell'area europea [1]

La situazione in Sicilia

Per quanto riguarda la Sicilia ad oggi sono operativi 10 impianti per un totale di capacità produttiva di circa 46 Mm³/anno. Gli impianti più grandi sono installati a Gela e Porto Empedocle e sono in funzione sin dal 1974 [3].

Un quadro sintetico delle capacità e tecnologie degli impianti di dissalazione presenti in Sicilia è riportato nella tabella 1, da cui è escluso l'impianto ad osmosi inversa di Porto Empedocle oggetto di un paragrafo dedicato.

Tabella 1 – Impianti di dissalazione in Sicilia – tipologia e capacità [3]

IMPIANTO	TECNOLOGIA	CAPACITA' (nominale)			GG operativi giorni	CAPACITA' (attuale) m ³ /anno
		m ³ /d	l/s	m ³ /anno		
GELA	MSF	13.200	153	4.818.000	330	4.356.000
	MSF	13.200	153	4.818.000	330	4.356.000
	MSF	13.200	153	4.818.000	330	4.356.000
	MSF	13.200	153	4.818.000	330	4.356.000
	MSF	14.400	167	5.256.000	330	4.752.000
	RO	16.848	195	6.149.520	330	5.559.840
TRAPANI	MED	8.700	100	3.175.500	330	2.871.000
	MED	8.700	100	3.175.500	330	2.871.000
	MED	8.700	100	3.175.500	330	2.871.000
	MED	8.700	100	3.175.500	330	2.871.000
PORTO EMPEDOCLE	MVC	1.600	18	584.000	310	496.000
	MVC	1.600	18	584.000	310	496.000
	MVC	1.600	18	584.000	310	496.000
LAMPEDUSA	MVC	450	5,2	164.250	300	135.000
	MVC	450	5,2	164.250	300	135.000
LINOSA	MVC	250	2,9	91.250	310	77.500
	MVC	250	2,9	91.250	310	77.500
PANTELLERIA "MAGGIULUVEDI"	EDR	450	5,2	164.250	300	135.000
	EDR	450	5,2	164.250	300	135.000
PANTELLERIA "SATARIA"	RO	200	2,3	73.000	300	60.000
	MVC	1.600	18,5	58.400	310	496.000
LIPARI	MVC	1.600	18,5	58.400	310	496.000
	MVC	1.600	18,5	58.400	310	496.000
	MVC	1.600	18,5	58.400	310	496.000
USTICA	MVC	500	5,8	182.500	310	155.000
	MVC	500	5,8	182.500	310	155.000
TOTAL		135.198	1.561,6	46.719.270		44.267.840

Gli impianti a più alta capacità sono del tipo MSF (Multi Stage Flash) ed OI (Osmosi Inversa) mentre di taglia inferiore sono gli impianti MED (Multiple Effect Desalination) a compressione meccanica del vapore (MVC) ed EDR (Electrodialysis Reversal). Le ultime due tipologie sono di capacità ridotta perché collocati nelle isole minori (quindi dimensionati per supplire ad un fabbisogno idrico limitato). Tutti gli impianti sono suddivisi in unità modulari (vedi tabella 1).

Va rilevato che la capacità nominale non sempre coincide con la reale capacità prodotta. Ad esempio nell'impianto di Gela, un modulo MSF (da 153 l/s) è da tempo fuori funzione, gli altri 3 di pari capacità vengono utilizzati in maniera parziale (in genere 2 funzionano ed 1 rimane come capacità di riserva) mentre gli altri 2 MSF e OI sono regolarmente funzionanti [4].

La produzione reale varia di anno in anno da un minimo di 19 l/s per l'anno 2007 nell'impianto MVC di Porto Empedocle ad un massimo 509 l/s per l'impianto di dissalazione di Gela nell'anno 2007 [4].

Un altro dato importante è relativo al consumo di energia elettrica rilevato in alcuni degli impianti siciliani (tabella 2). I valori sono compresi nel range 1,1 – 12 kWh/m³ (per gli impianti che utilizzano anche energia termica, come MSF e MED, si tratta di consumi parziali di energia). Per gli impianti che utilizzano energia elettrica per la dissalazione, tipicamente OI e MVC, il consumo rilevato è variabile da 8 a 12 kWh/m³

Tabella 2 – Impianti di dissalazione in Sicilia – consumi elettrici rilevati (*utilizzano energia termica) [3]

IMPIANTO	TECNOLOGIA	CONSUMO ELETTRICO
		kWh/m ³
GELA	MSF*	1 - 1,2
	RO	8 - 9
TRAPANI	MED*	2,9
PORTO EMPEDOCLE	MVC	11 - 12

DISSALAZIONE MEDIANTE L'UTILIZZO DI ENERGIA EOLICA

L'impiego di fonti di energia rinnovabile nel campo della dissalazione è ancora nella fase di ricerca e sperimentazione e ricoprono un ruolo marginale nel panorama complessivo.

In funzione del tipo di processo utilizzato e quindi dell'energia sono possibili vari accoppiamenti fra le FER e la dissalazione [1,5,6]. Nei processi che utilizzano energia termica viene privilegiato l'accoppiamento con il solare termico o con le biomasse mentre se si utilizza l'energia elettrica si preferisce l'eolico al fotovoltaico stante la differenza nei costi delle due tecnologie.

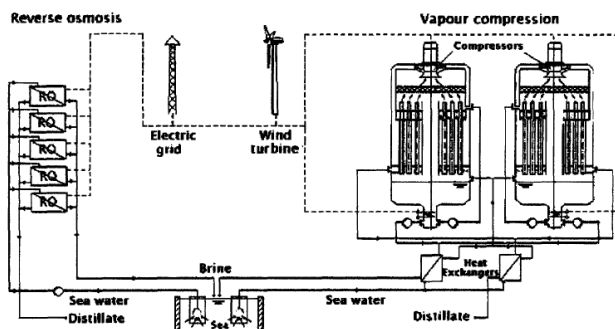


Figura 3 – Schema dell'impianto analizzato in [7]

Alcuni studi [2] sono stati condotti su sistemi wind-OI confrontando diverse turbine e diverse taglie di impianto OI e valutando il Levelized Cost dell'acqua dissalata (ovvero il costo di produzione) al variare di alcuni parametri energetici e tecnologici.

In particolare in [2] è stato valutato il livello di influenza sul LC della capacità d'impianto, del consumo specifico di energia, dei costi di sostituzione delle membrane, della distribuzione di Weibull e del tasso di interesse. I parametri che hanno rilevato maggiore influenza sono la capacità d'impianto, i costi di esercizio e manutenzione degli impianti OI (esclusi i costi energetici), il tasso di interesse, il consumo specifico di energia e la velocità media del vento.

Zejli in [7] effettua una valutazione economica di un sistema wind-OI-MVC a partire da uno scenario Base (Baseline) in cui l'energia viene fornita dalla rete comparandolo con un sistema in cui vi è un'aliquota di energia proveniente da impianti eolici.

Zejli arriva a stimare il LC in 1,67 €/m³ per impianto OI (con capacità di 1200 m³/g) con energia prelevata dalla rete e in 1,50 €/m³ se l'energia proviene da impianti eolici. Il consumo specifico è stato assunto pari a 5 kWh/m³ e il tasso di interesse al 10 %, mentre il costo dell'impianto di dissalazione è di 2400 €/m³/g.

Ancora alcuni studi [1] hanno riguardato la valutazione del potenziale rinnovabile (solare termico, fotovoltaico e biomasse) per applicazioni di dissalazione nella Regione Sicilia effettuando una valutazione economica sull'accoppiamento delle tecnologie.

In [8] vengono infine affrontati dei casi studio per la valutazione combinata sistemi wind-OI per gli USA.

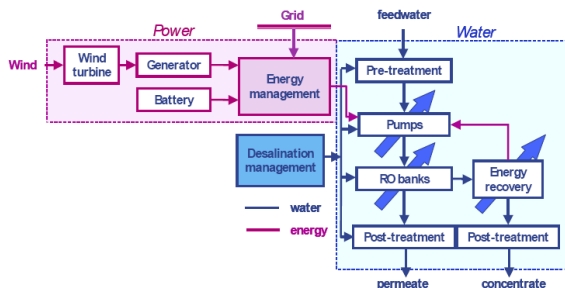


Figura 4 – Schema a blocchi di un impianto ad osmosi inversa associato all'eolico [9]

ANALISI DEI COSTI

I costi del processo di dissalazione dipendono da molti fattori: questo tipo di tecnologia richiede, oltre alle spese di investimento e di gestione ordinaria, anche quantitativi variabili di energia termica, meccanica od elettrica per l'ottenimento del prodotto finale. Il tipo di impianto, la tecnologia adottata e la fonte di energia impiegata, costituiscono i fattori sui quali si articola tutto il problema passato, presente e futuro della dissalazione.

Dai dati in letteratura [10] si rileva che i costi del capitale investito, la somma dei costi energetici e di quelli di impianto varia, dal 70 al 90% del costo totale dell'acqua prodotta. Questo indica come risibili l'incidenza dei costi di personale.

Costo complessivo

Il costo totale può essere scomposto nelle sue componenti principali: i costi di capitale necessari per l'investimento, i costi energetici per lo svolgimento del processo, i costi operativi ed i costi di manutenzione degli impianti produttivi.

I costi di realizzazione di un impianto di dissalazione possono essere studiati ed analizzati considerando tutti i diversi aspetti relativi ai costi delle singole parti dell'impianto, ai costi di engineering e a quelli legati ad aspetti finanziari (finanziamenti, interessi, ecc.).

Per effettuare una corretta analisi dei costi si deve fare riferimento alle analisi economiche effettuate su impianti esistenti, per i quali i costi si dividono in:

- **Costi diretti (70-85%)**, costituiti da:
 - o acquisto ed installazione apparecchiature, 50-60%;
 - o eventuali costi legati alla produzione del vapore, elettricità, aria compressa, pozzi, cisterne, che variano tra l'8 ed il 35%;
 - o costi per opere di presa a mare e di scarico effluenti, influiscono per il 5-10%;
 - o costi per opere civili varie, variabili tra il 6 ed il 20%.
- **Costi indiretti (15-30%)**:
 - o costi di ingegneria e supervisione, variabili tra il

4 ed il 21%;

- o spese varie (assicurazione, servizi medici, permessi, costi legati ai finanziamenti, ecc.), variano tra il 5 ed il 22%;
- o costi di contingenze (calamità naturali, errori umani, variazione nei prezzi dei componenti, ecc.), anche questi attestati tra il 5 ed il 20%.

E' facile notare come molti di questi valori siano fortemente dipendenti dalla natura del processo (processi non convenzionali potrebbero avere maggiori costi indiretti, legati alla maggiore incertezza nella progettazione, al maggiore rischio, ecc.), dalla natura del sito (possono variare i costi delle opere civili, delle opere di presa a mare e scarico, ecc.), dal costo della manodopera e dal tipo di finanziamento ottenuto.

Ai costi di realizzazione sopra indicati vanno aggiunti i costi di esercizio, per i quali sarebbe utile effettuare una suddivisione dei costi totali in: costi energetici, costi di manutenzione e costi di reagenti utilizzati (non sempre però è possibile fare questa suddivisione, poiché non sempre sono reperibili dati in forma così dettagliata).

Review economico degli impianti ad osmosi inversa

Per impianti che adottano la tecnologia dell'osmosi inversa i costi di produzione e di impianto possono variare significativamente al variare della salinità, della qualità dell'acqua, della percentuale di solidi sospesi, della ubicazione geografica.

In generale i costi di impianto ed i costi di esercizio nei processi a membrana diminuiscono drasticamente al diminuire della salinità dell'acqua da trattare. L'andamento dei costi è, in genere, inversamente proporzionale alle capacità dell'impianto.

Nell'analisi dei costi gestionali di diversi impianti ad osmosi inversa esistenti si considerano anche i costi relativi ai processi di pretrattamento e di condizionamento dell'alimentazione (utilizzo di reagenti, flocculanti e disinfettanti).

I costi di un impianto per osmosi inversa variano in funzione delle dimensioni dello stesso. In generale, la percentuale sul capitale d'investimento per l'acquisto delle membrane necessarie, può variare tra il 10 ed il 40%, rispettivamente per piccoli e grandi impianti. La parte di spese che riguarda gli altri componenti del circuito (pompe, valvole, tubazioni, contenitori) può raggiungere anche il 40% dei costi totali nei grandi impianti, mentre, la parte elettronica di controllo automatico del sistema (PLO) può arrivare al 15% dell'investimento.

Per quel che riguarda i costi operativi, la sostituzione delle membrane richiede la spesa maggiore, tra il 30 ed il 45% del totale, infatti, la vita media delle stesse può variare tra i 6 mesi, in trattamenti di acque particolarmente aggressive, ed i 4-6 anni (di solito la garanzia è però di 2-3 anni).

Decidendo di adoperare membrane ceramiche anziché polimeriche, si andrà incontro ad una spesa iniziale maggiore, bilanciata però da una durata più lunga delle membrane esposte alle medesime condizioni. I pretrattamenti sono un altro fattore molto importante, da valutare per ogni singolo caso, mentre, la pulizia delle membrane contribuisce mediamente al 5-10% sul totale dei costi operativi.

Tecniche innovative di recupero energetico applicate al flusso possono abbassare i costi almeno del 10% [10].

Il processo ad osmosi inversa richiede tempi di avviamento compresi fra i 15' e 2 h in funzione della taglia dell'impianto e questo denota una certa semplicità tecnologica e li rende idonei per le situazioni di emergenza o in cui è richiesta una certa elasticità nell'erogazione. Viceversa un avviamento lento è indice di complessità di impianto e di scarsa flessibilità.

L'osmosi inversa presenta problemi per la manutenzione della pompa principale (che per dissalare acqua di mare lavora attorno ad una pressione variabile tra le 60 e le 80 atm) e per il fatto che le membrane hanno una vita limitata (massimo 5 anni), per cui in media dopo tre anni di servizio è richiesta la graduale sostituzione.

Il processo ad osmosi inversa richiede che l'acqua in alle membrane abbia la caratteristica di non torbidità, per questo sono previsti pretrattamenti che in alcuni casi, per il loro costo e per la loro superficie occupata, inducono ad abbandonare la tecnologia ad osmosi inversa. L'uso di questa tecnologia è sconsigliato quando le caratteristiche chimico/fisiche dell'acqua siano variabili nel tempo, come ad esempio nei mari caratterizzati da bassi fondali sabbiosi, nei quali la torbidità varia notevolmente con il variare delle condizioni climatiche locali. I pretrattamenti si scelgono in base alla qualità delle acque a disposizione: solitamente come pretrattamento si adottano sistemi in grado di rimuovere particelle dell'ordine dei 5 µm (filtri a sabbia, iniezioni di reagenti chimici per il controllo del pH, clorazione).

L'IMPIANTO DI DISSALAZIONE AD OSMOSI INVERSA DI PORTO EMPEDOCLE

L'impianto si estende per circa 7.500 m² ed è ubicato nell'area portuale (area di sviluppo industriale) del Comune di Porto Empedocle ed è in grado di erogare circa 100 l/s, corrispondenti ad un apporto di 3 milioni di metri cubi d'acqua all'anno, a vantaggio della città di Agrigento.

La realizzazione consta di due parti distinte e complementari: i moduli veri e propri di dissalazione e le cosiddette opere civili.

Queste ultime consistono in una serie di infrastrutture necessarie al funzionamento dell'impianto di dissalazione: una condotta sottomarina per il prelievo dell'acqua, una stazione di pre-trattamento per la filtrazione iniziale, un basamento per alloggiamento dei moduli di dissalazione realizzato in calcestruzzo su pali, opere per la restituzione a mare della salamoia, un impianto di pompaggio dell'acqua dissalata ed infine una condotta di mandata dell'acqua potabile dall'impianto al partitore di Villaseta (Ag).

Le opere civili hanno avuto un costo complessivo di 5,25 milioni di euro. L'impianto di dissalazione vero e proprio, invece, è stato realizzato in "project financing", ed è gestito dalla "New Ctida Hydro Siset", società che ha firmato il contratto con il Comune di Agrigento, garantendo la fornitura triennale dell'acqua al prezzo di 1,18 €/m³. La tabella 3 mostra i volumi erogati negli anni 2007 e 2008 nei quali la capacità reale è stata pari a quella nominale.

Tabella 3 –Produzione reale dell'impianto di dissalazione ad OI di Porto Empedocle [4]

ANNO	PORTO EMPEDOCLE (OI)	
	m ³ /anno	l/s
2007*	2.789.540	88,45
2008	3.202.435	101

Entrata in esercizio febbraio 2007

Da sopralluogo effettuato presso l'impianto, per cortese concessione della Ditta conduttrice, sono stati raccolti i seguenti dati:

- Il numero di pompe sommerse per l'adduzione è 5 con potenza unitaria di 90 kW;
- Il numero di pompe a basamento per le unità di OI è 5 con potenza unitaria di 315 kW;
- Sui costi energetici dell'impianto grava anche la presenza di ulteriori pompe di rilancio verso il partitore di Villaseta in numero pari a 2 di 175 kW ciascuna (dislivello 130 m circa);
- Le membrane utilizzate sono della PROTEC garantite per i primi 3 anni (la vita utile è stimata i 6-7 anni);
- Ogni modulo da 25 l/s è composto da 28 unità con 4 membrane in serie per un totale complessivo dell'unità di riserva di 560 membrane;
- Il costo di ogni membrana è di circa 500 €;
- L'impianto è in funzione 24 h;
- Le unità di personale impiegato sono 10 (con presenza di 2 unità per ogni turno di 8 h);
- I costi bimestrali di energia ammontano a circa 300.000 €;
- I costi di trattamento chimico ammontano a circa 30.000 - 40.000 €/anno;
- I costi di manutenzione ammontano a circa 30.000 €/anno;
- Il consumo energetico stimato (comprensivo della mandata verso partitore) è di circa 4,5 kWh/m³ di acqua trattata;

Dai dati raccolti risulta un costo dell'impianto (opere civili e macchinari) di circa 10 M€ e quindi con una incidenza dei costi di gestione, rispetto al costo iniziale I₀ e rispetto al volume trattato, come in tabella 4 (ipotizzando una disponibilità annua dell'impianto del 95 %).

Il modulo segnato in tratteggio, nella figura 5, è il modulo di riserva utilizzato per garantire la capacità nominale quando altri moduli richiedono operazioni di fermo per manutenzione o quando viene richiesta una maggiore produzione.

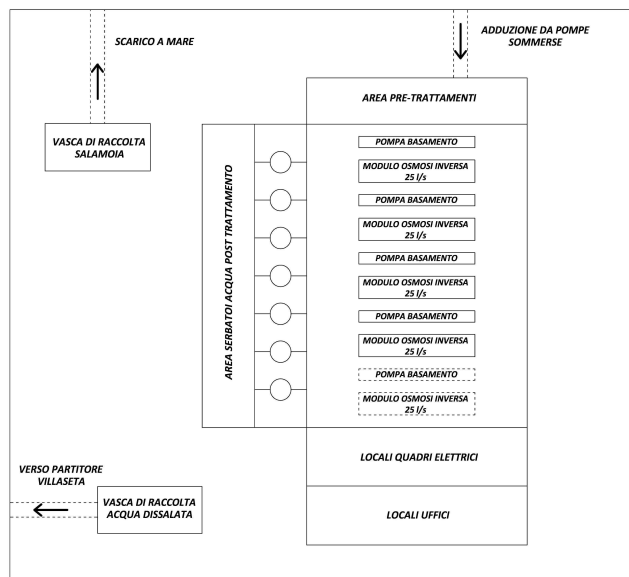


Figura 5 – Layout dell'impianto di dissalazione per osmosi inversa di Porto Empedocle



Figura 6 – Vista dell'impianto di dissalazione a OI presso Porto Empedocle (Ag)

Tabella 4 – Confronto dei costi rilevati con costi di letteratura

TIPO DI COSTO	COSTO ASSOLUTO RILEVATO		RELATIVO		COSTI DA LETTERATURA			
			% I ₀	€/m ³	[2] €/m ³	[1] €/m ³	[17] €/m ³	[5] €/m ³
LABORATORIO	20000	€/mese	2,40%	0,080	-	0,06	0,03-0,2	-
MANUTENZIONE	30000	€/anno	0,30%	0,010	0,2	0,022	0,02-0,05	0,15-0,60
PRETRATTAMENTO	40000	€/anno	0,40%	0,013	0-0,04	-	0,09-0,25	0,04-0,1
MEMBRANE	280000	€/3 anni	2,80%	0,031	0,03-0,1	0,11-0,29	-	0,03-0,1
PERSONALE	300000	€/anno	3,00%	0,100	-	-	-	-
TOTALI			8,90%	0,235	0,23-0,34	0,19-0,37	0,14-0,55	0,24-0,80

Si noterà una certa discrasia fra i valori rilevati e quelli presenti in letteratura dovuta con tutta probabilità alla qualità dell'acqua trattata, alle modalità con cui vengono accorpate alcune voci (ad esempio in alcuni studi i costi di manutenzione sono comprensivi del personale addetto). Sui costi totali di gestione (esclusi gli energetici) comunque i dati appaiono allineati con l'impianto di Porto Empedocle che si colloca nella fascia media bassa con circa 0,235 €/m³.

CASO STUDIO: VALUTAZIONE ECONOMICA DISSALAZIONE DA FONTE EOLICA IN SICILIA

L'analisi condotta in questo paragrafo riguarda la valutazione, in condizioni di penetrazione intorno al 20 % della fonte eolica nel sistema elettrico, di accoppiare come sistema di stoccaggio dell'energia dei sistemi a dissalazione a osmosi inversa.

Tale studio nasce da alcune osservazioni principali:

- Esistono alcune aree in Sicilia con forti carenze idriche (Province di Agrigento e Trapani su tutte);
- La linea elettrica a 220 kV si trova perlopiù dislocata nell'area litoranea cui si andrebbero ad allacciare (previa trasformazione) gli impianti ad OI;

Il lavoro è distinto in due fasi in funzione della tipologia di eolico considerato: onshore e offshore.

È infatti necessario per effettuare una valutazione economica specificare i costi delle due tecnologie per valutare le ricadute in termini di spesa energetica negli impianti a OI.

È stato dapprima valutato il costo dell'acqua da OI nell'ipotesi di utilizzo di energia elettrica da fonte convenzionale attraverso il Levelized Cost (LC - €/m³), cioè il rapporto fra i costi annui sostenuti e la quantità di acqua dissalata. Il calcolo del LC compendia fra i costi annui oltre a quelli di gestione propriamente detti anche dei costi finanziari

e precisamente i costi d'investimento ammortati.

Per il calcolo della spesa energetica sono stati utilizzati i valori forniti da [11] per utenze in Media Tensione e cioè di 0,14 €/kWh per impianti fino a 1000 m³/g e 0,13 €/kWh per capacità superiori.

L'analisi è stata condotta utilizzando i dati di tabella 5, in cui sono indicati i costi della tecnologia eolica e quella a osmosi inversa distinti per taglia dimensionale, e le altre ipotesi del calcolo economico.

Tabella 5 – Dati economici utilizzati nel lavoro [1,2,5]

COMPARTO EOLICO	
IMPIANTO EOLICO ON-SHORE	1000-1500 €/kW
IMPIANTO EOLICO OFF-SHORE*	1800-2500 €/kW
VITA UTILE	25 anni
TASSO	6 %
COMPARTO DISSALAZIONE	
DISPONIBILITA' IMPIANTO	90 %
TASSO	6%
VITA UTILE	25 anni
CONSUMO DI ENERGIA	4 kWh/m ³
COSTO INVESTIMENTO I ₀	
200 m ³ /g	1600 €/m ³ /g
500 m ³ /g	1500 €/m ³ /g
1.000 m ³ /g g	1300 €/m ³ /g
2.000 m ³ /g	1100 €/m ³ /g
3.000 m ³ /g	1000 €/m ³ /g
10.000 m ³ /g	900 €/m ³ /g
COSTO LABORATORIO	1,5 % I ₀
COSTO MEMBRANE	0,03 €/m ³
COSTO PRETRATTAMENTI	0,04 €/m ³
COSTI O&M	
200 m ³ /g	0,4 €/m ³
500 m ³ /g	0,33 €/m ³
1.000 m ³ /g	0,27 €/m ³
2.000 m ³ /g	0,20 €/m ³
3.000 m ³ /g	0,13 €/m ³
10.000 m ³ /g	0,11 €/m ³

La figura 7 presenta i risultati dell'analisi. Si nota che il costo unitario dell'acqua dissalata diminuisce al crescere della taglia dell'impianto OI e si colloca sotto il valore di 1,18 €/m³ (tariffa applicata dai gestori dell'Impianto di Porto Empedocle) solo per capacità superiori ai 2000 m³/g.

I dati in letteratura [4] mostrano che le tariffe applicate da SICILIACQUE spa [4], in Sicilia per la fornitura idrica si aggirano intorno ai 0,61 €/m³ (tariffa unica media di vendita verso enti pubblici per acqua proveniente da sorgenti, invasi, impianti di dissalazione). Non si è ritenuto necessario, ai fini del presente, indagare sulle tariffe di vendita, da enti terzi (ATO, Comuni, Consorzi di Bonifica) presso l'utenza (domestica o agricola). I risultati sono in linea con i dati presenti in letteratura [1] che vedono variare il LC da 0,46 a circa 1,50 €/m³ e indicano valori superiori per impianti di piccola taglia [12]

Tabella 6 – LC per alcuni impianti ad OI [12]

TAGLIA IMPIANTO [m ³ /g]	LC [€/m ³]
< 100	1,20 -15,00
250 -1.000	1,00 -3,14
1.000 -4.800	0,56 -1,38
15.000 -60.000	0,38 -1,30

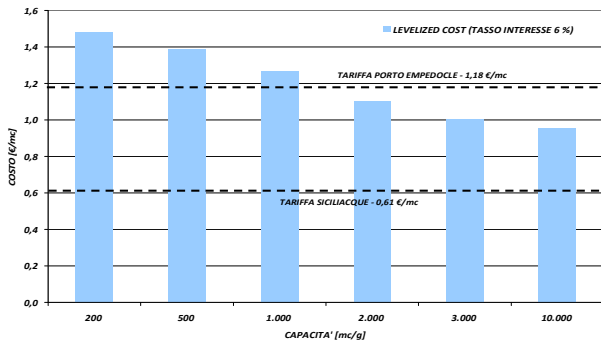


Figura 7 – Levelized cost (€/m³) per impianti ad OI di varie capacità (prezzo energia da fonte convenzionale)

Impianti on shore

Con i dati sopra esposti è stato calcolato il LC considerando come prezzo di acquisto dell'energia in ingresso all'impianto ad osmosi inversa il costo di produzione del kWh.

Questa ipotesi, congiunta ad un livello di penetrazione della fonte eolica nel sistema elettrico superiore a quello attuale, si coniuga con ciò che viene indicato in letteratura come curtailment [13,14].

Infatti una delle ipotesi previste in sistemi di potenza fortemente penetrati dall'eolico è proprio quella di disconnettere le wind farm dalla rete per regolare domanda e offerta in condizioni di esuberanti di produzione. In tal caso l'energia prodotta non è remunerata e la presenza di impianti ad osmosi inversa (che innalzano la domanda) potrebbe garantire la remunerazione perlomeno a copertura dei costi di produzione. Il calcolo prevede che l'energia proveniente dalle wind farm sia capace di supplire ad una aliquota della domanda energetica degli impianti a OI variabile fra il 25 e il 100 % per ogni taglia di impianto ipotizzata.

Le figure sotto riportate mostrano il LC al variare delle taglie dell'impianto, della percentuale di fabbisogno coperto da fonte eolica, la curva dei costi convenzionali e le tariffe applicate nell'impianto di Porto Empedocle e quella media siciliana. Le figure sotto riportate fanno riferimento ad un tasso di interesse del 6 %.

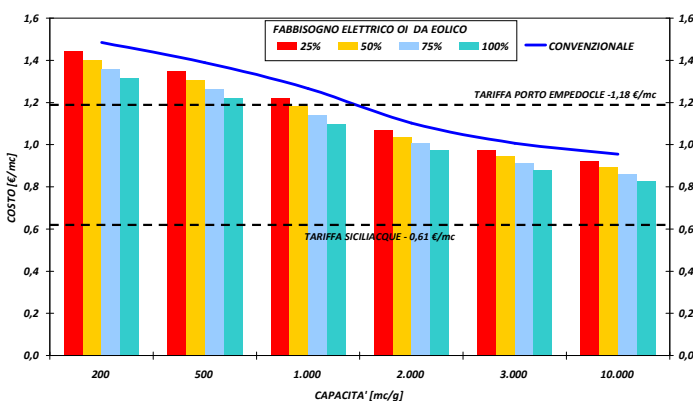


Figura 8 – LC energia proveniente da impianto on-shore (1000 €/kW -1000 MWh/MW)

Si nota (figura 8) che il LC risulta più basso della curva convenzionale per tutte le taglie mentre da 2.000 m³/g a 10.000 m³/g rientra nella fascia di vendita individuata dalle due linee orizzontali. Nella figura 9 invece il LC è inferiore al

costo base per tutte le taglie di impianto e addirittura entra nella fascia di vendita (1,18-0,61) in quasi tutti gli impianti scendendo sotto la quota di 0,61 per impianti con capacità di 10.000 m³/g con copertura da eolico superiore al 75 %.

Per quanto visto si rileva la scarsa incidenza dei costi energetici sugli impianti di piccola taglia.

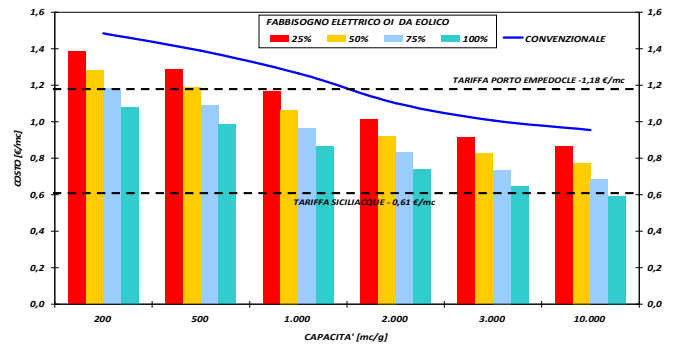


Figura 9 – LC energia proveniente da impianto on-shore (1000 €/kW -2500 MWh/MW)

Variando il costo di installazione da 1000 a 1500 €/kW i costi di produzione del kWh eolico risultano più alti dei costi da fonte convenzionale (vedi figura 10). Ovviamente in questo caso al crescere dell'aliquota di copertura del fabbisogno da eolico cresce il LC.

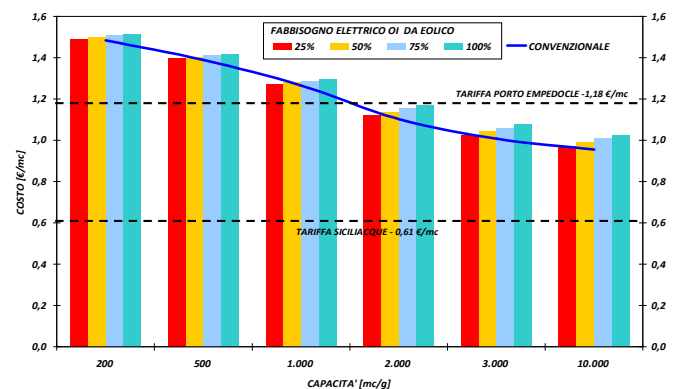


Figura 10– LC energia proveniente da impianto on-shore (1500 €/kW -1000 MWh/MW)

Per wind farm con fattore di carico 2.500 ore/anno (figura 9) il LC risulta invece sempre inferiore al costo base e collocato nella fascia dai 1.000 ai 10.000 m³/g.

Un'ultima verifica è stata condotta considerando un costo della tecnologia on shore di 800 €/kW (stimato negli scenari di medio-lungo periodo di sviluppo della tecnologia eolica dalla EWEA [15]). In questo caso a partire da impianti di 1000 m³/g di capacità (con copertura eolica superiore al 25 %) si rientrerebbe nel range di vendita.

Tale risultato denota l'estrema convenienza di questo scenario ancor più rafforzato dalla figura 11 (FC=2500 ore/anno) in cui, ovviamente, la convenienza si allarga verso gli impianti di piccola capacità con un LC di circa 1,00 €/m³ per un impianto OI di 200 m³/g la cui domanda energetica è garantita totalmente da impianti eolici. La realizzazione di ciò (la domanda energetica è di circa 260.000 kWh/anno per un impianto di 200 m³/g) sarebbe garantita addirittura da una sola turbina di 1 MW.

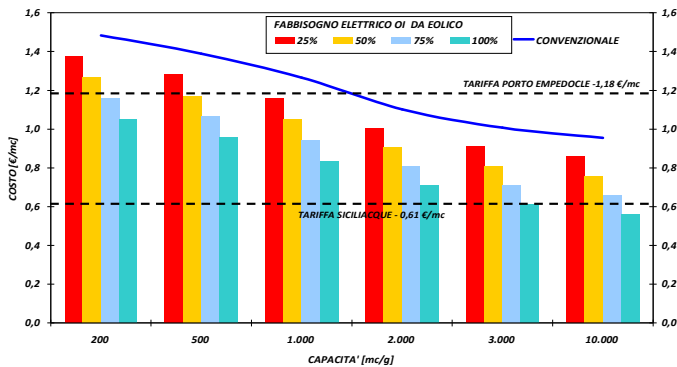


Figura 11– LC energia proveniente da impianto on-shore (800 €/kW - 2500 MWh/MW)

IMPIANTI OFF SHORE

Il lavoro è stato poi condotto considerando l'energia proveniente da impianti off shore che presentano costi superiori nelle installazioni ma di contro ricadrebbero in aree (perlomeno in Sicilia) con FC superiori alle 2000 ore anno. In particolare il costo della tecnologia è stato fatto variare dai 1800 €/kW alle 2500 €/kW, mentre il campo delle producibilità è compreso fra 2500 e 3500 MWh/MW (vedi Atlante Italiano del Vento [16]). I risultati indicano la convenienza per impianti di taglia non inferiore ai 1000 m³/g. L'effetto dell'aumento del costo di installazione da 1000 €/kW (on shore) a 1800 €/kW (off shore) è compensato dall'aumento della risorsa disponibile.

Diverso è il caso in cui (figura 12) la risorsa disponibile aumenta sino a 3500 ore anno e quindi il LC si abbassa fino ad un valore di 0,61 €/m³ per impianti con taglie uguali o superiori a 10.000 m³/g.

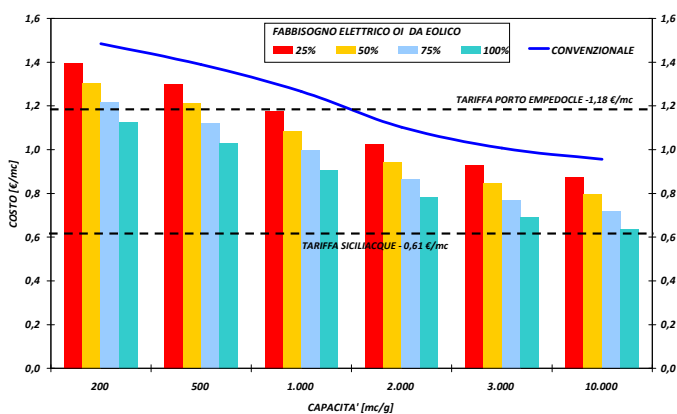


Figura 12– LC energia proveniente da impianto off-shore (1800 €/kW -3500 MWh/MW)

Si nota che anche con un costo dell'energia piuttosto basso i piccoli impianti risentono degli oneri di investimento e di gestione e rimangono al di sopra della fascia di vendita.

Con il passaggio del costo della tecnologia da 1800 a 2500 €/kW (dovuta per esempio alla profondità del fondale o alla distanza della costa) si ha un aumento del costo di produzione del kWh eolico ma una riduzione del LC.

Per wind farm con 3500 ore di funzionamento a potenza nominale si riscontra una diminuzione del LC per tutte le taglie di impianto (figura 13).

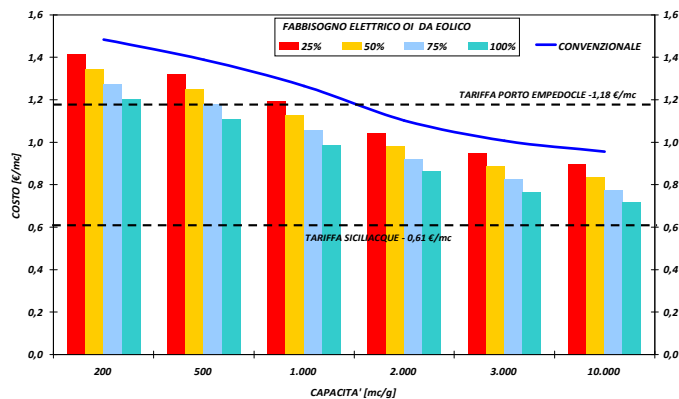


Figura 13– LC energia proveniente da impianto off-shore (1800 €/kW -3500 MWh/MW)

In tabella 7 si osserva che con un fattore di carico di 1000 MWh/MW sono sufficienti circa 13 MW di eolico per soddisfare il fabbisogno di energia di impianto OI da 10.000 m³/g.

Un'ultima analisi riguarda la valutazione del costo dell'energia in input agli impianti OI capaci di rendere il LC pari alla tariffa media fra le 2 esposte nella valutazione (0,895 €/m³).

Tabella 7 – Calcolo della potenza eolica per la copertura del fabbisogno di dissalazione per diverse taglie

CAPACITA' OI [m ³ /g]	FABBISOGNO [MWh/anno]	FC [MWh/MW] IMPIANTI ON SHORE /OFFSHORE					
		1000	1500	2000	2500	3000	3500
200	262,8	0,26	0,18	0,13	0,11	0,09	0,08
500	657	0,66	0,44	0,33	0,26	0,22	0,19
1.000	1.314	1,31	0,88	0,66	0,53	0,44	0,38
2.000	2.628	2,63	1,75	1,31	1,05	0,88	0,75
3.000	3.942	3,94	2,63	1,97	1,58	1,31	1,13
10.000	13.140	13,14	8,76	6,57	5,26	4,38	3,75

Nella tabella 8 è possibile osservare come anche con un costo nullo dell'energia in ingresso agli impianti OI con capacità di 200 m³/g non si riesce ad ottenere un LC pari alla tariffa media di 0,895 €/m³.

Tabella 8 – Calcolo del costo dell'energia per LC = 0,895 €/m³ e del kWh eolico

CAPACITA' [m ³ /g]	200	500	1.000	2.000	3.000	10.000
COSTO ENERGIA [€/kWh]	-	0,017	0,047	0,078	0,102	0,115
LC [€/m ³]	0,92	0,895	0,895	0,895	0,895	0,895
COSTO DEL kWh EOLICO [€/kWh] – i=6%; n=25 anni.						
FATTORE DI CARICO [MWh/MW]	COSTO DELLA TECNOLOGIA [€/kW]					
	400	800	1.000	1.500	1.800	2.500
1.000	0,039	0,079	0,098	0,147	-	-
1.500	0,026	0,052	0,065	0,098	-	-
2.000	0,020	0,039	0,049	0,074	-	-
2.500	0,016	0,031	0,039	0,059	0,071	0,098
3.000	-	-	-	-	0,059	0,082
3.500	-	-	-	-	0,051	0,070

Negli impianti con taglia 1000 m³/g il costo dell'energia in ingresso dovrebbe essere di 4,7 c€/kWh raggiungibile solo con costi della tecnologia eolica inferiori a 400 €/kW ubicati in aree con alto potenziale.

In tabella 8 sono altresì evidenziati sullo stesso sfondo le opzioni wind-OI in cui il costo del kWh eolico risulta inferiore al costo dell'energia in ingresso all'impianto di dissalazione. Per impianti con capacità pari o superiore a 10.000 m³/g tutte le combinazioni (fattore di carico-costi del kWh eolico) tranne la 1.000-1.500 riescono a garantire un LC inferiore a 0,895

€/m³.

Ovviamente lo stesso risultato potrebbe essere raggiunto con la diminuzione dei costi iniziali degli impianti ad osmosi inversa.

I valori evidenziati in tabella 8 sono da intendersi come limite massimo di convenienza per aree a potenziale eolico più meno alto e quindi come indice di rischio nella valutazione dell'investimento di realizzazione di un impianto eolico in condizioni di elevata penetrazione di eolico nel sistema elettrico

CONCLUSIONI

Lo studio dimostra che, rispetto alle tariffe di vendita applicate in Sicilia variabili da 1,18 €/m³ per l'impianto a OI di Porto Empedocle a 0,61 €/m³ (tariffa applicata da *Siciliacque*), si abbia una certa convenienza ad accoppiare le due tecnologie in condizioni di forte penetrazione eolica e nel sistema elettrico e nella copertura del fabbisogno di dissalazione.

In condizioni di supero della domanda, infatti, i gestori del sistema elettrico potrebbero essere costretti a disconnettere alcune wind farm dalla rete (cosiddetto *wind curtailment*) ed una soluzione, vista la modularità e la flessibilità degli impianti di dissalazione a OI, potrebbe essere rappresentata dall'utilizzo di questa energia remunerata al prezzo di produzione.

I risultati mostrano che per piccoli impianti OI l'incidenza degli oneri di investimento sul Levelized Cost dell'acqua dissalata è superiore ai benefici derivanti dalla diminuzione della spesa energetica.

Sia per il caso onshore che offshore si riscontra una effettiva convenienza di accoppiamento delle tecnologie per impianti OI con taglie superiore ai 1000 m³/g con livelli di eccellenza per taglie uguali o superiori a 10.000 m³/g.

Rispetto al carnet di scenari analizzati l'opzione migliore è quella in cui, per effetto dell'apprendimento tecnologico, in impianti on shore si raggiungesse un costo di installazione di 800 €/kW (figura 11).

In queste condizioni anche per impianti eolici con 1000 ore equivalenti di funzionamento a potenza nominale si avrebbe un LC ricadente all'interno della fascia di vendita anche per impianti con capacità uguale a 1000 m³/g.

La valorizzazione dei costi energetici degli impianti ad osmosi inversa al costo produzione dell'energia eolica potrebbe garantire, in condizioni di forte penetrazione eolica nel sistema elettrico, ai gestori delle wind farm perlomeno la garanzia di un flusso di cassa positivo a fronte di un mancato guadagno derivante da possibili disconnessioni della wind farm dalla rete elettrica imposte dal Gestore e produrrebbe nel contempo delle economie nelle tariffe di vendita dell'acqua dissalata.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, T. Melin, State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination* 216, 1–76, 2007
- [2] L. Garcia-Rodriguez, V. Romero-Terero, C. Gbmez-Camacho, Economic analysis of wind-powered desalination, *Desalination* 137, 259-265, 2001

- [3] Beccali M., Sorce M., Galletto J., "The potential of renewable energies in Sicily for water desalination applications" – in "Solar Desalination for the 21st Century", Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, held in Hammamet, Tunisia, 23-25 February 2006 Eds. Rizzuti, Lucio; Etouney, Hisham M.; Cipollina, Andrea (2007), 400 p., ISBN-10: 1-4020-5506-4, ISBN-13: 978-1-4020-5506-5
- [4] Siciliacque – www.siciliacquespa.it
- [5] Demet Akgul, Mehmet Cfkamakce, Necati Kayaalp, Ismail Koyuncu, Cost analysis of seawater desalination with reverse osmosis in Turkey, *Desalination* 220 (2008) 123–131
- [6] E. Mathioulakis, V. Belessiotis, E. Delyannis, Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art, *Desalination* 203 (2007) 346–365
- [7] D. Zejli, R. Benchrif, A. Bennouna, K. Zazi, Economic analysis of wind-powered desalination in the south of Morocco *Desalination* 165, 219-230, 2004
- [8] NREL Technical Monitor: Scott Schreck, Integrated Wind Energy/Desalination System, October 11, 2004 — July 29, 2005,
- [9] Markus Forstmeier, Fredrik Mannerheim, Fernando D'Amato, Minesh Shah, Yan Liu, Michael Baldea, Albert Stella, Feasibility study on wind-powered desalination, *Desalination* 203, 463–470, 2007
- [10] Josè Massimiliano Galletto - SCENARI DI SVILUPPO DELL'ENERGIA EOLICA IN SICILIA - MODELLI E STRUMENTI INNOVATIVI PER IL NETWORK MANAGEMENT – Tesi di dottorato in Energetica – Palermo – 2008;
- [11] PUBBLICAZIONE DELLE OPZIONI TARIFFARIE DI DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA IN VIGORE DAL 1 GENNAIO 2007 (del. AEEG n. 203/06), Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas;
- [12] Ioannis C. Karagiannis, Petros G. Soldatos, Water desalination cost literature: review and assessment, *Desalination* 223, 448–456, 2008
- [13] Georgilakis, Pavlos S., Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume: 12, Issue: 3, April, 2008, pp. 852-863
- [14] Troncoso, E.; Newborough, M., Implementation and control of electrolyzers to achieve high penetrations of renewable power *International Journal of Hydrogen Energy* Volume: 32, Issue: 13, , pp. 2253-2268 September, 2007
- [15] Pure Power -Wind Energy Scenarios up to 2030. www.ewea.org;
- [16] Atlante Italiano del Vento - <http://atlanteolico.erse-web.it/viewer.htm>

SUMMARY

In this paper, the possible benefits of joining wind energy (onshore and offshore) with reverse osmosis desalination plants will be described. In particular, the cost-effectiveness resulting from the use of wind energy for the production of desalinated water, by reverse osmosis desalination plant, have been evaluated. To perform the economic evaluations, a literature search has been played and an economic analysis of a reverse osmosis system, built recently in the province of Agrigento, has carried out. The choices on the main parameters involved in estimation come from the analysis of the existing plant.