

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

**Simulazione di un sistema di dissalazione e generazione di energia elettrica
alimentato da fonti di energia rinnovabile sull'isola di Sal**

Relatore: Prof.ssa Anna Stoppato

Laureando: Igor Munaretto

Matricola: 1179275

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

L'idea dei dissalatori, per desalinizzare l'acqua di mare e renderla disponibile per le attività umane, non è nuova e sembra oggi sempre più una soluzione concreta e realistica per soddisfare almeno parte del fabbisogno d'acqua dolce dell'umanità.

Lo scopo di questa tesi è quello di realizzare un modello di impianto ad osmosi inversa alimentato da fonti di energia rinnovabile in grado di soddisfare il fabbisogno idrico ed elettrico degli abitanti presenti in un'isola. Per la realizzazione del modello è stato utilizzato il software di calcolo Matlab-Simulink, con il quale è stata eseguita una simulazione per poter effettuare una valutazione tecnica ed economica. Successivamente è stata eseguita un'ottimizzazione dell'impianto, con l'obiettivo di minimizzare il costo di produzione dell'acqua e massimizzare il valore attuale netto dell'investimento. Analizzando i risultati ottenuti, si evince che i costi di produzione dell'acqua desalinizzata sono minori rispetto a quelli sostenuti per l'importazione della risorsa. Inoltre, grazie alla contemporanea produzione di energia elettrica, viene sfruttata in modo migliore l'energia prodotta dalle risorse rinnovabili che altrimenti verrebbe rigettata.

Indice

Introduzione	1
Capitolo I - La risorsa idrica e la desalinizzazione	3
1.1 L'acqua come risorsa fondamentale	3
1.1.1 L'impronta idrica	3
1.1.2 Consumo d'acqua	4
1.1.3 Alla ricerca dell'Oro Blu	5
1.2 La desalinizzazione	5
1.2.1 Tecnologie e Principi Fisici	7
1.3 Classificazione dei processi	8
1.4 Processi termici	9
1.4.1 Distillazione flash a stadi multipli (Multi-Stage Flash Distillation, MSF)	9
1.4.2 Distillazione ad effetti multipli (Multi-Effect Distillation, MED)	10
1.4.3 Distillazione con compressione di vapore (Vapour Compression Distillation, VCD) ..	12
1.4.4 Desalinizzazione sottovuoto (Vacuum freeze desalination, VFD)	13
1.4.5 Raffreddamento con refrigerante secondario (Secondary Refrigerant Freezing, SRF) .	13
1.5 Processi a membrana	14
1.5.1 Osmosi inversa (RO)	14
1.5.1.1 Pretrattamento	15
1.5.1.2 Pompa ad alta pressione	15
1.5.1.3 Membrana	15
1.5.1.4 Configurazione del campo di membrane	17
1.5.1.5 Sistemi per il recupero dell'energia	18
1.5.1.6 Post-trattamento	19
1.5.2 Elettrodialisi (ED)	20
1.5.3 Osmosi Avanzata (FO)	21
1.6 Stato attuale dei processi di desalinizzazione	22

1.7	Impianti di desalinizzazione alimentati a energia rinnovabile	24
1.7.1	Sistemi di desalinizzazione diretta	25
1.7.1.1	Solar still	25
1.7.1.2	Desalinizzazione con umidificazione-deumidificazione (Desalination with Humidification-Dehumidification, HD)	25
1.7.1.3	Solar Chimney	27
1.7.2	Sistemi di desalinizzazione indiretta	28
1.7.2.1	Sistemi termici	28
1.7.2.1.1	Impianti MSF e MED alimentati da un campo solare a concentrazione ...	28
1.7.2.1.2	Solar Ponds	29
1.7.2.2	Sistemi a membrana	29
1.7.2.2.1	Osmosi Inversa	29
1.7.2.2.2	Elettrodialisi	31
1.7.3	Considerazione sugli impianti di desalinizzazione alimentati a energia rinnovabile ...	32

Capitolo II - Studio e attuazione del modello per l'impianto di desalinizzazione	33
2.1 Collocazione dell'impianto	33
2.2 Layout dell'impianto	33
2.3 Domanda idrica e funzionamento di ogni componente	34
2.3.1 Domanda idrica	34
2.3.2 Impianto Fotovoltaico	35
2.3.3 Impianto Eolico	37
2.3.4 Batteria	38
2.3.5 Impianto di desalinizzazione	39
2.3.6 Serbatoio di accumulo	41
2.4 Funzionamento impianto	42
2.5 Indici tecnici	45
2.6 Indici economici	46
2.7 Raccolta dati	48
2.8 Software e codici usati	50

Capitolo III – Realizzazione impianto per copertura fabbisogno idrico	53
3.1 Dimensionamento componenti	53
3.1.1 Impianto di desalinizzazione	53
3.1.2 Serbatoio di stoccaggio	54
3.1.3 Impianti di generazione a fonte rinnovabile	54
3.1.3.1 Impianto Eolico	55
3.1.3.2 Impianto Fotovoltaico	55
3.1.4 Inverter	55
3.1.5 Batteria	56
3.2 Risultati dei modelli	56
3.2.1 Risultati modello con consumo costante	56
3.2.1.1 Risultati modello mese di febbraio	58
3.2.1.2 Risultati modello mese di agosto	60
3.2.1.3 Valori degli indici tecnici ed economici	62
3.2.2 Risultati modello con consumo specifico variabile	63
3.2.2.1 Risultati modello mese di febbraio	63
3.2.2.2 Risultati modello mese di agosto	65
3.2.2.3 Valori degli indici tecnici ed economici	66
3.3 Valutazioni per l’ottimizzazione dei risultati ottenuti dai due modelli	66
 Capitolo IV – Realizzazione impianto per copertura fabbisogno idrico ed elettrico	 69
4.1 Layout dell’impianto	69
4.2 Fabbisogno elettrico e generatore diesel	70
4.2.1 Fabbisogno elettrico	70
4.2.2 Generatore diesel	71
4.3 Funzionamento impianto con generatore diesel	71
4.4 Indici tecnici	72
4.5 Indici economici	73
4.6 Dimensionamento componenti	74

4.7 Risultati modello	75
4.8 Valutazioni per l'ottimizzazione dei risultati ottenuti	77
Capitolo V – Ottimizzazione del costo dell'acqua	79
5.1 Algoritmo genetico	79
5.1.1 L'algoritmo genetico in Matlab	79
5.2 Limiti delle variabili di ottimizzazione	81
5.3 Vincoli non lineari	81
5.4 Parametri prestazionali	82
5.5 Risultati dell'ottimizzazione	82
Capitolo VI - Ottimizzazione della configurazione d'impianto di desalinizzazione e fornitura di energia elettrica	85
6.1 Limiti delle variabili di ottimizzazione	86
6.2 Vincoli non lineari	87
6.3 Parametri prestazionali	87
6.4 Indici tecnico-economici	87
6.5 Risultati dell'ottimizzazione	88
Capitolo VII – Confronto tra l'impianto di sola dissalazione e l'impianto di dissalazione e produzione di energia elettrica	91
7.1 Confronto tra le taglie delle due configurazioni	91
7.2 Risultati tecnici ed economici delle due configurazioni	92
Capitolo VIII – Confronto tra modelli situati in luoghi diversi	95
8.1 Confronto tra le taglie dei due modelli	95
8.2 Risultati tecnici ed economici dei due modelli	96
Conclusioni	101
Bibliografia	103

Introduzione

Con il continuo miglioramento delle condizioni di vita e con l'aumento della popolazione, la richiesta di acqua è destinata a crescere sempre più rapidamente, tanto che, in questi ultimi tempi si sta facendo strada una seria preoccupazione per la sua disponibilità futura. Se si dovesse continuare a consumare acqua ad un ritmo sempre maggiore, il futuro della specie umana e di ogni altro organismo vivente potrebbe essere compromesso. Eppure, l'acqua è straordinariamente diffusa sul pianeta (copre oltre il 75% della sua superficie). Il volume d'acqua degli oceani, ad esempio, è stimato nell'ordine di oltre un miliardo e trecento milioni di km³, una quantità veramente enorme, ma si tratta di acqua che non può essere impiegata per soddisfare le più disparate esigenze dell'uomo. Il resto dell'acqua presente sul pianeta è costituito dai ghiacciai, dai laghi e dai fiumi oltre che da quella trattenuta nel suolo delle regioni più aride; notevoli quantità di acqua sono poi presenti sotto forma di vapore nell'atmosfera (dieci volte di più di quella che scorre in tutti i fiumi del mondo). La parte della cosiddetta acqua dolce rappresenta meno dello 0,1 per cento del totale. Solo questa è l'acqua che normalmente viene utilizzata dall'uomo per l'alimentazione e la pulizia personale e domestica. Molto più elevato è il consumo di questo bene prezioso per l'irrigazione delle coltivazioni e per gli impieghi industriali. [1] Nel 2030, secondo lo Stockholm International Water Institute, circa il 47% della popolazione mondiale potrebbe avere problemi di scarsità di acqua. Pertanto, la dissalazione dell'acqua di mare potrebbe rappresentare una valida alternativa, in quanto molto più abbondante. [2] L'obiettivo di questa tesi è quello di studiare tale tecnologia alimentata da fonti rinnovabili per la produzione di acqua dolce. Si è sviluppato un sistema per la desalinizzazione dell'acqua di mare attraverso un impianto ad osmosi inversa, alimentato tramite un impianto eolico uno fotovoltaico e un sistema di accumulo dell'energia di tipo elettrochimico. Successivamente tale modello è stato implementato per poter soddisfare anche il fabbisogno di energia elettrica, con il supplemento di un generatore diesel ausiliario. La zona scelta per lo sviluppo della tesi è l'isola di Sal, una delle dieci isole vulcaniche dell'arcipelago di Capo Verde, situate nell'oceano Atlantico a 500 km al largo delle coste del Senegal. Questo tipo di impianto può essere sviluppato anche in altre zone dove le riserve d'acqua dolce sono limitate, l'importazione della risorsa molto costosa e non c'è la possibilità di connettersi alla rete elettrica nazionale. L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di dimensionare l'impianto, in modo da trovare la configurazione migliore dal punto di vista tecnico-economico.

Capitolo I

La risorsa idrica e la desalinizzazione



L'acqua come risorsa fondamentale

Tra tutte le risorse naturali l'acqua è la più importante: senz'acqua non c'è vita. L'acqua ricopre il 71% della superficie terrestre, ma la maggior parte dell'acqua presente sul nostro pianeta è troppo salata per essere usata. Oltre ad essere scarsa e talvolta poco accessibile, l'acqua è spesso inquinata a causa delle attività umane o, nei Paesi in via di sviluppo, per carenza di impianti fognari adeguati. Ancora oggi un miliardo e mezzo di persone nel mondo non ha accesso all'acqua potabile e numerose aree soffrono di stress idrico. Se in Italia un cittadino può contare sulla disponibilità di 237 litri di acqua al giorno, negli Stati Uniti questo dato va a attestarsi su 435 litri, mentre per un abitante del Madagascar scende a soli 10 litri al giorno (in Africa una donna percorre in media 6 chilometri al giorno per approvvigionare la propria famiglia di acqua). Impiegata per bere, lavare, irrigare, l'acqua è la più usata delle risorse del pianeta. A causa della crescita della popolazione, del conseguente sviluppo dell'agricoltura e dell'industria, dall'inizio del Novecento, il consumo di acqua è aumentato di circa 7 volte. [3]

L'Impronta idrica

L'impronta idrica (water footprint) è un indicatore che mostra il consumo di acqua dolce da parte della popolazione. Si definisce l'impronta idrica di un individuo, di una comunità, di un'organizzazione o di un sistema produttivo come il volume complessivo di acqua dolce utilizzata per produrre i beni ed i servizi utilizzati dall'individuo/comunità/organizzazione/industria. Esistono tre diverse impronte idriche, identificate con dei colori:

- Impronta idrica blu: indica il volume di acqua dolce sottratta al ciclo naturale (prelevandola da fiumi, laghi e falde acquifere) per scopi domestici, industriali o per l'irrigazione dei campi coltivati.
- Impronta idrica verde: indica il volume di acqua piovana traspirata dalle piante durante la coltivazione.
- Impronta idrica grigia: rappresenta il volume di acqua inquinata, quantificata come il volume di acqua necessario per diluire gli inquinanti al punto che la qualità delle acque torni a rispettare gli standard di qualità.

1.1.2 Consumo d'acqua

In Italia l'85% del consumo idrico si registra nel settore agricolo per l'irrigazione dei campi destinati all'alimentazione umana e destinati a fornire mangime al bestiame. Già, quindi quando consumiamo carni o latte aumentiamo -in modo indiretto- la nostra impronta idrica. Parlando di alimenti, servono 13 litri di acqua per far maturare un pomodoro e ben 2.500 litri per un hamburger. [4]

Esempi di impronta idrica

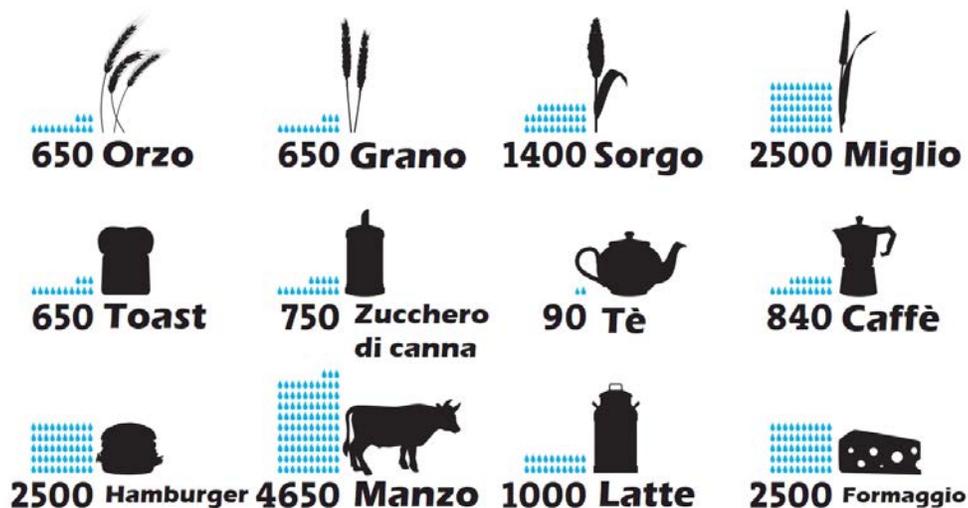


Figura 1 Esempi di impronta idrica [5]

L'8% dei consumi d'acqua si registra nel settore industriale e solo il 7% in ambito domestico. Da una stima globale, il 70% dell'acqua è utilizzato nel settore primario, il 20% dall'industria e il restante 10% dall'uso domestico. Tuttavia, queste percentuali non sono altro che una media, i valori sono molto diversi se si analizzano ad esempio i consumi dei paesi in via di sviluppo, nei quali l'agricoltura incide per più dell'80% e si ferma all'8% nell'uso domestico, mentre nei paesi industrializzati tali percentuali

si aggirano intorno al 30% nell'uso agricolo e raggiungono quasi il 60% nel settore industriale. I valori appena citati non sono solo il frutto di un gioco di proporzioni, ovviamente l'agricoltura incide di più nei paesi in cui il settore industriale è meno sviluppato e viceversa, ma è anche la risultante di un fenomeno chiamato esternalizzazione dell'impronta idrica. [6]

1.1.3 Alla ricerca dell'Oro Blu

La crescita esponenziale della popolazione mondiale, l'inurbamento, l'industrializzazione dei Paesi in via di sviluppo e il cambiamento dei modelli di consumo hanno aumentato costantemente il fabbisogno d'acqua dolce umano, che continuerà a crescere in modo significativo nel futuro prevedibile. La ricerca del preziosissimo "oro blu" si fa sempre più pressante e costituisce già per alcuni paesi una vera e propria emergenza. Ad inasprire ulteriormente la situazione intervengono diversi fattori:

- circa 500 milioni di persone consumano il doppio dell'acqua che la natura spontaneamente reimmette nell'ambiente;
- le falde freatiche stanno diminuendo significativamente in tutti i continenti;
- il volume delle acque di scarico non trattate aumenta ogni anno e l'80% di tutte le acque è smaltito senza prima essere filtrato.
- nelle regioni più aride del pianeta, poi, il riscaldamento globale determina fenomeni di siccità, rendendo inevitabili gravi crisi idriche e forzati flussi migratori.

Al momento attuale, più di 2 miliardi di persone vivono con il rischio di un accesso ridotto alle risorse di acqua potabile e si prevede che entro il 2050, almeno una persona su quattro vivrà in un paese colpito da carenza cronica o ricorrente di acqua dolce. Fortunatamente, negli ultimi dieci anni sono stati compiuti grandi progressi, grazie ai quali oggi oltre il 90% della popolazione mondiale ha accesso a fonti di acqua potabile. Tra le azioni che diversi Paesi hanno già intrapreso per far fronte a quella che possiamo definire una vera e propria sfida di dimensioni globali, vi è l'abbattimento degli elevati costi e consumi della desalinizzazione (o dissalazione) dell'acqua di mare, processo quest'ultimo che rappresenta una delle più valide alternative ad un futuro drammatico, già prospettabile. [7]

1.2 La desalinizzazione

La dissalazione è un processo di rimozione dei sali presenti in una soluzione acquosa. L'acqua di mare contiene dei sali disciolti e altri composti in soluzione o in sospensione, la cui quantità varia a seconda dei luoghi e delle stagioni. Alcuni dei sali disciolti sono il cloruro di sodio, il bicarbonato di calcio e il solfato di magnesio (Figura 2). Se le sostanze solide disciolte (Total solved Solids, TDS) sono assenti o sono troppo elevate, possono rendere un'acqua potabile di scarsa palatabilità o inadatta per molte applicazioni industriali (Tabella 1).

Constituent	Normal Seawater	Eastern Mediterranean	Arabian Gulf At Kuwait	Red Sea At Jeddah
Chloride (Cl ⁻¹)	18,980	21,200	23,000	22,219
Sodium (Na ⁺¹)	10,556	11,800	15,850	14,255
Sulfate (SO ₄ ⁻²)	2,649	2,950	3,200	3,078
Magnesium (Mg ⁺²)	1,262	1,403	1,765	742
Calcium (Ca ⁺²)	400	423	500	225
Potassium (K ⁺¹)	380	463	460	210
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻¹)	140	--	142	146
Strontium (Sr ⁺²)	13	--	--	--
Bromide (Br ⁻¹)	65	155	80	72
Boric Acid (H ₃ BO ₃)	26	72	--	--
Fluoride (F ⁻¹)	1	--	--	--
Silicate (SiO ₃ ⁻²)	1	--	1.5	--
Iodide (I ⁻¹)	<1	2	--	--
Other	1	--	--	--
Total Dissolved Solids	34,483	38,600	45,000	41,000

Figura 2 Ioni disciolti in alcuni mari del mondo

Acqua	TDS (mg/l)
Acqua potabile	<1000
Acqua a bassa salinità	1000-5000
Acqua ad alta salinità	5000-15000
Acqua marina	15000-50000

Tabella 1: concentrazioni di sali per diverse tipologie di acqua.

L'utilizzo dell'acqua di mare per la produzione di acqua potabile mediante rimozione dei sali è un processo conosciuto fin dall'antichità. Tuttavia, le prime applicazioni a livello industriale risalgono al secolo scorso, indicativamente agli anni Cinquanta. I metodi utilizzati appartengono a due grandi famiglie, che sfruttano rispettivamente l'energia termica o l'energia meccanica per la desalinizzazione. All'interno di ogni famiglia i singoli processi si differenziano poi per alcuni dettagli di principio relativamente al modo di utilizzare la sorgente di energia. L'energia disponibile per la dissalazione costituisce infatti uno dei parametri fondamentali per la scelta della tecnologia migliore da utilizzare e va attentamente valutata sia in termini qualitativi che quantitativi. Ogni processo presenta ovviamente vantaggi e svantaggi e deve essere accuratamente scelto caso per caso anche sulla base delle condizioni ambientali, dei vincoli e degli obiettivi che si vogliono perseguire. Nonostante i processi di dissalazione siano ormai impiegati, a livello industriale, da oltre mezzo secolo, si continua ancora oggi a ricercare nuove soluzioni, sia in termini di processo che in termini di materiali, volte ad aumentare la vita utile degli impianti e la loro affidabilità, il che si traduce in ultima analisi in una minimizzazione del costo unitario dell'acqua prodotta. Uno schema generale sul principio di funzionamento di un impianto di

desalinizzazione è rappresentato in Figura 3, dove si ha l'acqua di alimentazione prelevata dal mare o altra sorgente che arriva all'impianto e viene trattata con una certa spesa energetica. I prodotti risultanti sono due: l'acqua dissalata (o dolce) desiderata per l'uso umano e l'acqua residua (detta salamoia) che sarà rimessa in mare. Prima di passare all'impianto di dissalazione vero e proprio, l'acqua viene in genere pretrattata con additivi chimici e a valle dell'impianto subisce una fase di post trattamento a seconda del suo utilizzo finale. [8]

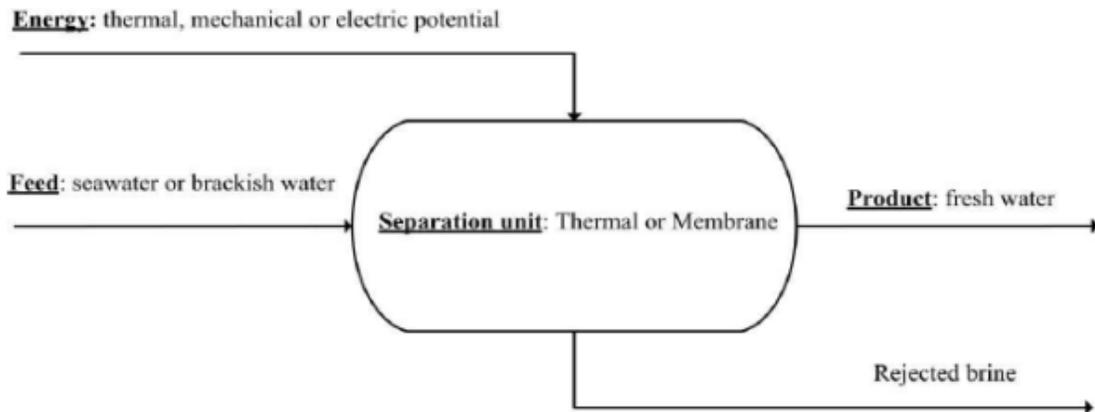


Figura 3 Schema generale di funzionamento di un impianto di dissalazione

Attualmente la desalinizzazione è in continua crescita, infatti la capacità installata degli impianti di desalinizzazione nel 1980 ammontava a 8.09 milioni di m³/giorno, mentre nel 2014 questo dato era di 90.07 milioni di m³/giorno, più di 10 volte superiore. Circa il 53% della capacità totale è stata installata dal 2005 e oggi ci sono impianti di desalinizzazione in più di 120 paesi [9].

Più del 50% della capacità di desalinizzazione totale è situata in Medio Oriente ed in Nord Africa, infatti l'aridità del terreno e la disponibilità di combustibili fossili rende queste zone adatte all'impiego di questa tecnologia.

A causa della crescente domanda di acqua dolce e dei cambiamenti climatici, attualmente si stanno costruendo degli impianti di desalinizzazione anche in zone che in passato non presentavano problemi di scarsità idrica, ma ora le loro riserve non sono più sufficienti a soddisfare la richiesta. [10]

1.2.1 Tecnologie e Principi Fisici

Il passaggio da un sistema ad una data entropia ad uno ad entropia minore comporta sempre una spesa di energia per “riordinare il sistema” la cui quantità teorica dipende solamente dallo stato iniziale e da quello finale che si vuole ottenere. Lo stesso vale se si vuole dissalare l'acqua, quindi per ridurre il disordine, ovvero togliere il sale dall'acqua è necessario spendere una certa quantità di energia.

L'energia primaria teorica da fornire al sistema per dissalare non cambia in funzione della tecnologia, da ciò si può affermare che il processo di dissalazione è in ogni caso energeticamente dispendioso.

L'energia minima necessaria per invertire il processo si può calcolare introducendo una quantità di sale in un metro cubo di acqua sufficiente a creare una soluzione equivalente a quella di mare e misurando

l'incremento di temperatura dovuto alla reazione esotermica. La variazione è di circa 0,64 °C corrispondenti a 0,75kWh/m³. Esprimendo la reazione chimica in termini più semplici:

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

In realtà date le inefficienze dei vari sistemi, ogni tecnologia ha bisogno di una quantità maggiore di energia. Negli impianti evaporativi l'energia è fornita sotto forma di calore, mentre in quelli ad osmosi inversa come energia di pressione. In ogni caso l'energia minima da fornire a parità di salinità e temperatura rimane la stessa indipendentemente dal processo, in quanto, il calore di dissoluzione dei sali, il gradiente ebullioscopico e l'energia potenziale della pressione osmotica si equivalgono in termini di energia. Esiste però una differenza sostanziale tra i due principali processi di dissalazione: i processi evaporativi usano energia termica (vapore) proveniente, ad esempio, da spillamenti di turbine per la produzione di energia elettrica, mentre in quelli ad osmosi inversa il funzionamento delle pompe è garantito dalla più pregiata energia elettrica. [11]

1.3 Classificazione dei processi

Ci sono differenti tecnologie di desalinizzazione disponibili e applicate nel mondo. Alcune di esse sono totalmente sviluppate e consolidate a livello industriale su larga scala, mentre altre non ancora arrivate a maturità tecnologica, sono usate solo in piccoli impianti dimostrativi o per scopi di ricerca e sviluppo. I processi di dissalazione si suddividono in due grandi gruppi: processi termici (impianti evaporativi) e processi a membrana (impianti a membrana). I primi separano i sali dall'acqua tramite evaporazione e condensazione, mentre i secondi fanno passare l'acqua attraverso una membrana che trattiene le particelle solide. [8]

I principali processi termici sono:

- Distillazione flash a stadi multipli (Multi-Stage Flash Distillation, MSF);
- Distillazione ad effetti multipli (Multi-Effect Distillation, MED);
- Distillazione con compressione di vapore (Vapour Compression Distillation, VCD);
- Desalinizzazione sottovuoto (Vacuum freeze desalination, VFD);
- Raffreddamento con refrigerante secondario (Secondary Refrigerant Freezing, SRF).

I principali processi a membrana sono:

- Osmosi inversa (Reverse Osmosis, RO);
- Elettrodialisi (Electrodialysis, ED);
- Osmosi avanzata (Forward Osmosis, FO).

1.4 Processi termici

1.4.1 Distillazione flash a stadi multipli (Multi-Stage Flash Distillation, MSF)

In questo processo le fasi di evaporazione e condensazione sono accoppiate in stadi successivi così che il calore latente di evaporazione possa venir riutilizzato per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso. Nell'apparecchio chiamato brine heater l'acqua salina di alimentazione viene scaldata, senza essere vaporizzata, alla sua massima temperatura (relativamente alla pressione in esercizio), chiamata top brine temperature, grazie alla condensazione del vapore saturo proveniente da un impianto termoelettrico o da un'altra forma di sorgente di calore. L'acqua salina calda poi fluisce, attraverso un orifizio, nel primo stadio di evaporazione dove vige una pressione minore e ciò provoca il flash, ossia l'improvvisa vaporizzazione dell'acqua. Con questo fenomeno gran parte dei sali disciolti precipita, nonostante alcuni (specialmente i solfati) possano comunque depositarsi nel riscaldatore. Il processo di flash raffredda l'acqua salina concentrata permettendo di raggiungere l'equilibrio termodinamico con il suo nuovo ambiente. Il vapore generato sale rapidamente, passa attraverso un demister, il quale elimina ogni goccia di liquido, e viene condensato sui tubi degli scambiatori di calore presenti nella parte più in alto di ciascun stadio. Da qui viene inviato allo stadio successivo fino ad essere estratto (freshwater) separatamente dall'acqua salata che non è riuscita a vaporizzare nei vari stadi (brine). Questi tubi sono raffreddati dall'acqua di alimento che si preriscalda prima di arrivare al brine heater convertendo parte dell'energia termica usata per l'evaporazione nel primo stadio. Questo processo è ripetuto in vari stadi successivi, fino a 40, che operano a valori di pressione via via decrescenti per massimizzare la conversione di acqua e di energia (Figura 4). Dopo ogni stadio l'acqua distillata risulta più fredda dello stadio precedente fino ad uscire dall'ultimo stadio più calda dell'acqua salata di alimentazione di 3°C-5°C e con una concentrazione totale di sostanze solide compresa tra 2 mg/l e 50 mg/l. Invece l'acqua di raffreddamento, che poi viene rigettata in mare, ha una temperatura di 8°C-12°C superiore alle condizioni ambientali. Inoltre, la depressione presente in ogni stadio è mantenuta da un eiettore di vapore azionato da vapore ad alta pressione o da una pompa meccanica a vuoto, i quali permettono di estrarre gas come l'ossigeno e l'anidride carbonica, disciolti nell'acqua salata, che durante l'evaporazione vengono rilasciati provocando una riduzione dello scambio di calore.

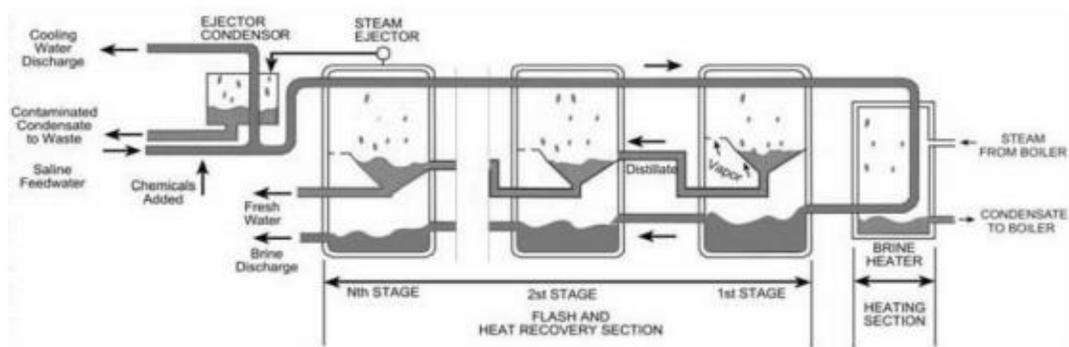


Figura 4 Schema del processo MSF

Molte unità MSF sono accoppiate a impianti di potenza con turbina a vapore (Figura 5). In questo caso il vapore prodotto dalla combustione del combustibile utilizzato viene espanso in turbina fino ad una temperatura di 90°C-120°C (riducendo così la potenza elettrica generata rispetto agli impianti termici a condensazione tradizionali) necessaria per alimentare il brine heater. Così la sezione relativa alla condensazione di un normale impianto di potenza viene sostituita dall'unità di desalinizzazione.

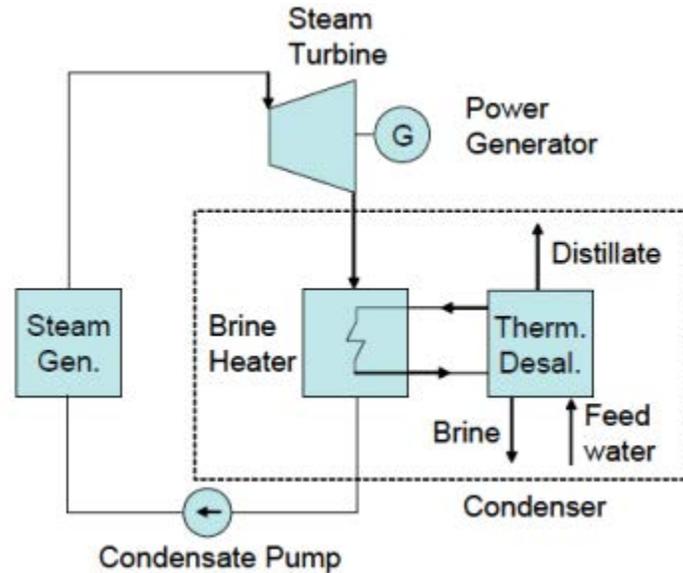


Figura 5 Possibile accoppiamento di un impianto termoelettrico tradizionale con un impianto di desalinizzazione MSF

Un tipico impianto MSF richiede da 250 kJ/kg a 350 kJ/kg di calore per kg di acqua depurata prodotta e un consumo di elettricità dai 3 kWh/m³ ai 5 kWh/m³ per m³ di acqua prodotta, alla quale si aggiunge una mancata produzione di potenza elettrica dovuta ad una più alta temperatura di fine espansione in turbina quantificabile in 6-8 kWh/m³. Le capacità tipiche di questi impianti si attestano su valori tra i 10000 m³/d e i 65000 m³/d. [8]

1.4.2 Distillazione ad effetti multipli (Multi-Effect Distillation, MED)

Questo processo è indicato anche con la sigla LTV (Long Tube Vertical) per la particolare disposizione degli apparecchi (uno sopra l'altro) che si possono trovare o con la sigla MEE (Multi Effect Evaporative). In questo processo il vapore si forma in minima parte per il fenomeno del flash e per la maggior parte per evaporazione. L'acqua di alimentazione è spruzzata o distribuita sulla superficie dell'evaporatore (di solito costituito da tubi) di diverse camere (effetti), sotto forma di film sottile in modo da promuovere l'evaporazione, dopo essere stata preriscaldata nella sezione superiore di ciascuna camera. I tubi evaporatori nella prima camera sono scaldati da vapore proveniente da un ciclo di potenza, analogamente al processo MSF. Il vapore prodotto nel primo effetto è condensato all'interno

dei tubi evaporatori dell'effetto successivo, dove viene prodotto altro vapore. Le superfici di tutte le altre camere sono riscaldate dal vapore prodotto in ognuno degli effetti precedenti. Ciascuno di questi ha un valore di pressione più basso del precedente e ci possono anche essere più di 16 camere. Il vapore prodotto nell'ultimo effetto è condensato in uno scambiatore, chiamato condensatore finale, il quale è raffreddato dall'acqua salata di alimento, la maggior parte della quale ritorna al mare ed una piccola parte è usata nell'impianto.

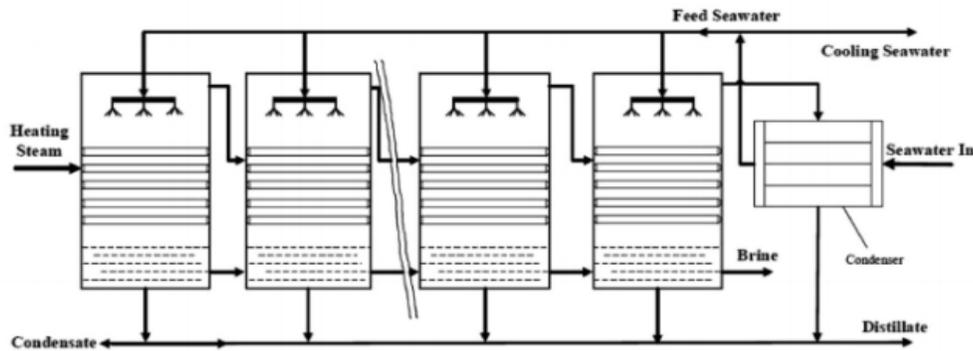


Figura 6 Schema del processo MED

Allo stato attuale la massima temperatura dell'acqua salata di alimento (top brine temperature) che si raggiunge è inferiore a 70°C per limitare la formazione di incrostazioni e corrosioni. L'acqua salata che ritorna alla sorgente ha una temperatura di 8°C - 12°C maggiore dell'acqua prelevata di alimento, mentre l'acqua prodotta ha una concentrazione di sostanze solide disciolte di 20 mg/l - 50 mg/l . Come i processi MSF, questi impianti possono essere accoppiati a cicli termoelettrici che forniscono il vapore necessario al corretto funzionamento. Qui però, la mancata produzione di potenza elettrica è minore rispetto al caso MSF e si possono continuare ad utilizzare turbine in modalità a condensazione e non in contropressione. In questi casi i processi MED richiedono un consumo di calore dai 145 kJ/kg ai 390 kJ/kg , per kg di acqua purificata, sotto forma di vapore a meno di $0,35\text{ bar}$ e un consumo di elettricità di $1,5 - 2,5\text{ kWh/m}^3$. Per i grandi impianti si hanno capacità comprese tra i $5000\text{ m}^3/\text{d}$ e i $25000\text{ m}^3/\text{d}$, mentre per quelli più piccoli i valori scendono tra i $250\text{ m}^3/\text{d}$ e i $5000\text{ m}^3/\text{d}$.

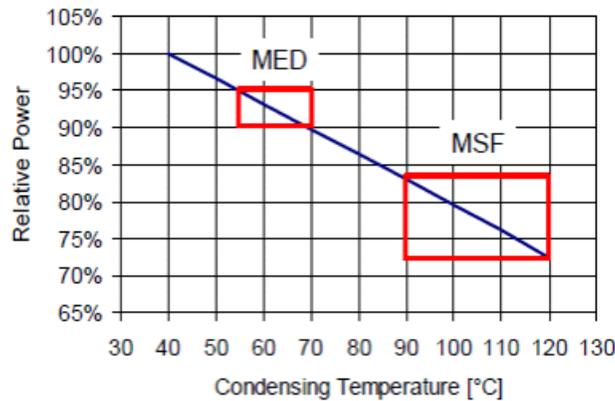


Figura 7 Valori di temperature per il vapore condensante prelevato dalla turbina per alimentare un processo MED e uno MSF e corrispondente mancata produzione di potenza elettrica

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

In questo impianto viene utilizzato il calore generato dalla compressione del vapore per evaporare l'acqua di mare. Il vapore può essere compresso con un compressore meccanico (Mechanical Vapour Compression, MVC) (Figura 8) o con un eiettore a vapore (Thermal Vapour Compression, TVC) (Figura 9). L'unica differenza tra un impianto a compressione meccanica ed uno a compressione termica è solamente il modo in cui viene compresso il vapore, mentre la parte restante dell'impianto è la medesima. In entrambi gli impianti l'acqua salata passa attraverso uno scambiatore di calore, dove la salamoia che viene scaricata dall'impianto cede calore all'acqua salata di alimentazione: in questo modo viene recuperata parte del calore dalla salamoia che altrimenti verrebbe rigettato all'esterno. Dopo questo preriscaldamento iniziale l'acqua di mare viene spruzzata mediante degli ugelli all'interno del mantello dell'evaporatore. All'interno dei tubi dell'evaporatore è presente del vapore condensante ad una temperatura più alta di quella dell'acqua salata. Data la differenza di temperatura, si stabilisce un flusso termico tra il vapore condensante e l'acqua salata all'esterno dei tubi, la quale viene riscaldata ed in parte evaporata. Il vapore generato viene quindi compresso e fatto passare all'interno dei tubi dell'evaporatore: tale compressione determina un aumento di pressione e di temperatura del vapore di una quantità sufficiente affinché esso funga da fonte di calore per l'evaporazione dell'acqua di mare nell'evaporatore. La componente liquida che non viene vaporizzata, la quale presenta una concentrazione maggiore di sale, viene raccolta nella parte inferiore dell'evaporatore ed è rimossa da una pompa. La salamoia viene in parte scaricata e in parte fatta ricircolare. La capacità di questa tipologia d'impianto è diversa a seconda che la compressione sia meccanica o termica. Gli impianti a compressione meccanica presentano delle taglie che vanno dai 100 ai 3000 m³/giorno; gli impianti a compressione termica presentano invece delle taglie comprese tra i 10000 m³/giorno e i 30000 m³/giorno. Un impianto a compressione meccanica di vapore richiede solamente energia elettrica per il suo funzionamento ed opera ad una temperatura massima di circa 74°C con un consumo di energia elettrica compreso tra i 7 e i 12 kWh/m³. [10]

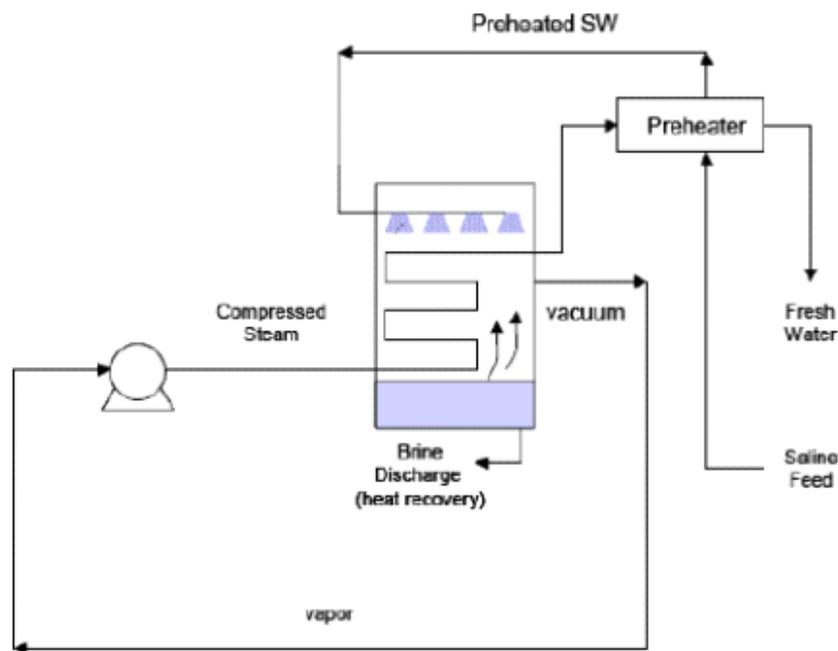


Figura 8 Schema di processo MVC

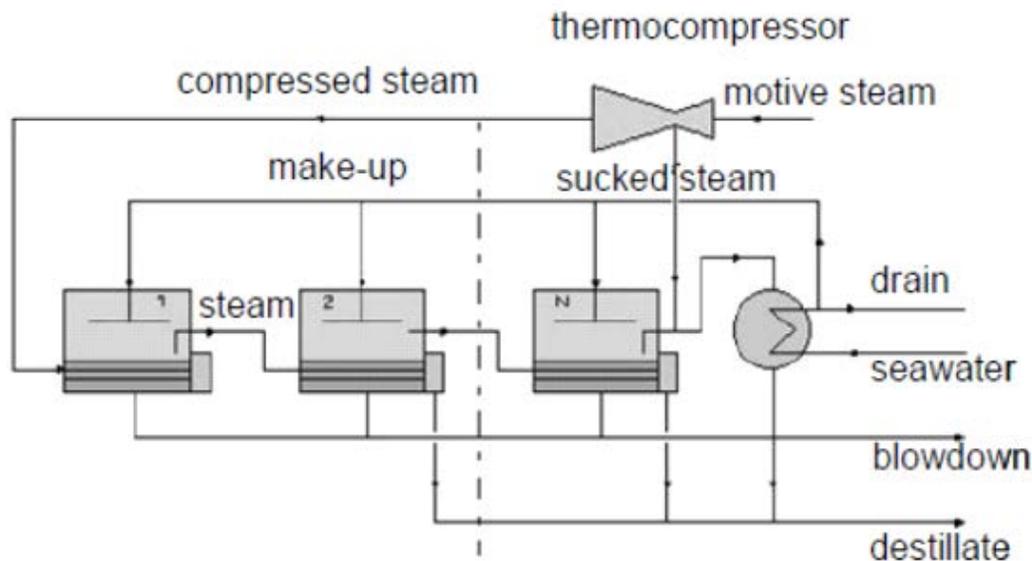


Figura 9 Schema di processo TVC

1.4.4 Desalinizzazione sottovuoto (Vacuum freeze desalination, VFD)

Il processo si basa sul principio per cui, quando l'acqua si congela, i sali disciolti in essa non congelano e quindi non fanno parte del ghiaccio. L'acqua salina fredda viene spruzzata in una camera a vuoto, dove vige una pressione di 0,04 atmosfere, così che una parte dell'acqua si trasforma in vapore, provocando la formazione dei cristalli di ghiaccio. Il vapore viene poi compresso (e surriscaldato) ad una pressione corrispondente alla tensione di vapore dell'acqua a 0°C ed inviato sul ghiaccio per ottenere la fusione. La salamoia uscente a qualche grado sotto lo 0°C raffredda l'acqua salata in ingresso. Sebbene negli scorsi decenni siano stati costruiti piccoli impianti, il processo attualmente non ha trovato sviluppo commerciale. [8]

1.4.5 Raffreddamento con refrigerante secondario (Secondary Refrigerant Freezing, SRF)

In questo caso si usa un fluido immiscibile con l'acqua, come il butano, che viene compresso ed inviato, in fase liquida, a miscelarsi con l'acqua salata. L'espansione dell'acqua nel congelatore provoca la formazione dei cristalli di ghiaccio, mentre l'immissione del butano compresso e surriscaldato nell'apparecchio di fusione provoca la liquefazione del butano e lo scioglimento del ghiaccio. Il vantaggio di questo ciclo è dato dal fatto che, a parità di acqua da trattare, occorre comprimere un volume di butano sensibilmente inferiore a quello del vapor d'acqua. Inoltre, il butano bolle a pressione atmosferica all'incirca a 0°C e quindi tutto il ciclo può operare a pressione atmosferica. Infine, il ciclo richiede minor consumi di energia ed ha una minor tendenza alla formazione di incrostazioni e corrosioni. Anche questo processo, al momento, non è sviluppato a livello commerciale. [8]

1.5 Processi a membrana

I processi a membrana realizzano una separazione tra due fluidi, attraverso una barriera selettiva (la membrana stessa), che viene attraversata solamente da alcune sostanze presenti nei fluidi mentre è poco, o per nulla, permeabile alle altre. [13]

1.5.1 Osmosi inversa (RO)

L'osmosi è il fenomeno di diffusione di molecole di acqua che si verifica quando una membrana osmotica è interposta tra due soluzioni a salinità differente. A cavallo della membrana si instaura una pressione proporzionale al gradiente di concentrazione che spinge l'acqua dalla soluzione povera di soluto a quella più ricca. Questa pressione risponde alla necessità del sistema di portarsi in equilibrio, ovvero uguagliare la salinità delle due soluzioni. Il flusso osmotico può essere interrotto applicando alla soluzione più concentrata una pressione pari a quella osmotica, se la pressione aumenta ulteriormente il flusso si inverte ottenendo il processo di osmosi inversa. La pressione e quindi l'energia da fornire per invertire il processo dipende dalla differenza di concentrazione; per l'acqua di mare è di circa 26-30 bar. Il processo come tutte le trasformazioni reali presenta delle dissipazioni di energia dovute alle perdite di carico a cavallo della membrana, alla temperatura di funzionamento e alla concentrazione della salamoia, quindi normalmente si opera a pressioni di 65-70 bar. Il processo comporta costi elevati per la compressione dell'acqua, per far sì che solo parte di essa (30-40%) venga dissalata. La salamoia rigettata dalla membrana contiene ancora molta energia di pressione che viene recuperata attraverso appositi sistemi (turbo-pompe o scambiatori di pressione) sviluppati recentemente che hanno permesso una diffusione via via maggiore di questa tecnologia per la dissalazione. Gli impianti ad osmosi inversa sono formati come mostra la Figura 10 da cinque componenti principali: pretrattamento, pompa ad alta pressione, membrana, recuperatore di energia e post trattamenti. [11]

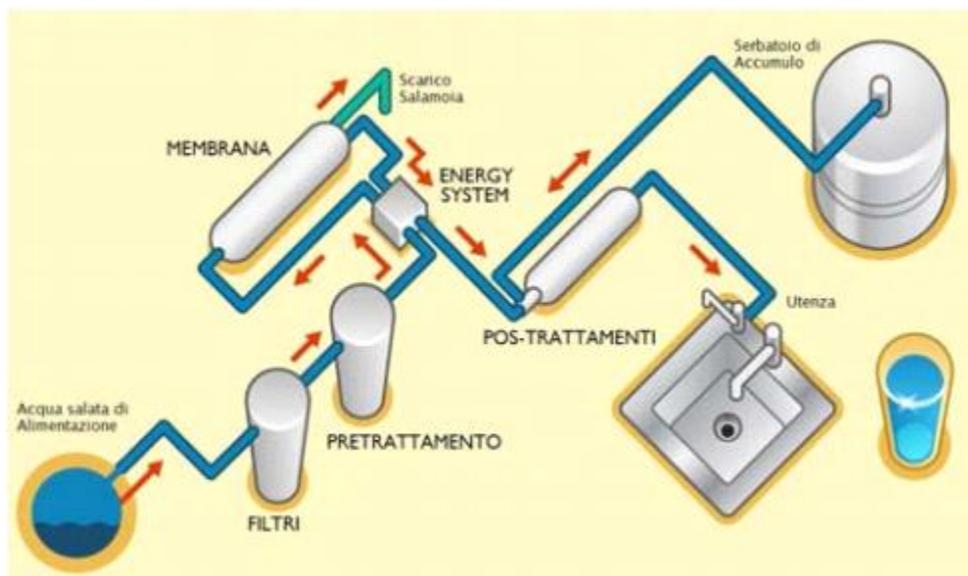


Figura 10 Schema impianto ad Osmosi Inversa

1.5.1.1 Pretrattamento

A differenza dei processi termici la dissalazione per osmosi inversa ha bisogno di pretrattamenti per assicurare il buon funzionamento dell'impianto e proteggere la membrana da eventuali occlusioni e dal contatto con elementi pericolosi contenuti nell'acqua. Il dimensionamento di questo componente varia molto con le qualità dell'acqua e quindi dalla zona geografica, in linea di massima i pretrattamenti da effettuare sono:

- Eliminare la componente biologica per proteggere le membrane da proliferazioni batteriche. Il sistema più utilizzato è l'iniezione di cloro, oppure attraverso trattamenti a raggi UV
- Chiarificazione o filtrazione preliminare, ovvero una microfiltrazione per eliminare particelle solide sospese
- Disoleazione. La presenza di oli e idrocarburi è dannosa per la membrana quindi devono essere rimossi con l'utilizzo di carboni attivi o la flottazione con aria
- Filtrazione meccanica attraverso filtri a sabbia
- Declorazione. Le membrane non apprezzano la presenza di cloro che l'acqua contiene dal pretrattamento necessario subito in precedenza, è quindi necessario provvedere alla rimozione del cloro attraverso il dosaggio di elementi fortemente riducenti. La presenza della filtrazione a carboni attivi può sostituire questo trattamento
- Correzione del pH che varia con la presenza di CO₂ dosando acido solforico e sfiatando la CO₂ [11]

1.5.1.2 Pompa ad alta pressione

Affinché il processo di osmosi inversa abbia luogo è necessario che l'acqua di mare abbia una pressione superiore a quella osmotica, quasi del doppio, per poter vincere le perdite di carico e per poter realizzare il processo con una velocità industriale accettabile. Poiché la pressione da fornire è elevata, ma la portata del fluido è bassa, si utilizzano pompe centrifughe monostadio oppure pompe volumetriche a pistoncini assiali, che garantiscono un funzionamento abbastanza costante. [10]

1.5.1.3 Membrana

La membrana, insieme alla pompa di alta pressione, è il componente più importante dell'impianto in quanto rende possibile la dissalazione dell'acqua di mare. Essa deve essere permeabile all'acqua, ma non ai sali, perciò deve essere molto sottile, infatti lo spessore è inversamente proporzionale al flusso che la attraversa. Oltre al sottile strato permeabile, la membrana è costituita anche da uno strato poroso di supporto meccanico, che ha la funzione di preservare la membrana dalla rottura. Poiché la permeabilità della membrana è solitamente bassa, sono necessarie delle superfici estese. Al fine di ridurre il volume totale, si utilizzano diverse tecnologie, tra cui le più diffuse sono le membrane a fibra cava ed a spirale avvolta. Nelle membrane a fibra cava l'acqua salata viene pompata da un'estremità

della fibra, il permeato fluisce attraverso le pareti mentre il concentrato esce dall'altra estremità della fibra. Più fibre vengono assemblate in modo da formare un singolo elemento. Maggiormente utilizzate sono le membrane a spirale avvolta (Figura 11), le quali sono costituite da due fogli di membrana e un distanziatore a rete interposto tra di essi e il tutto è avvolto a spirale attorno ad un tubo, per ottenere una maggiore compattezza. L'acqua salata entra da un'estremità di tale elemento, il permeato fluisce attraverso la membrana e scorre nel canale formato dal distanziatore fino a raggiungere il tubo collocato centralmente; dall'altra estremità della membrana invece fuoriesce il concentrato. [10]

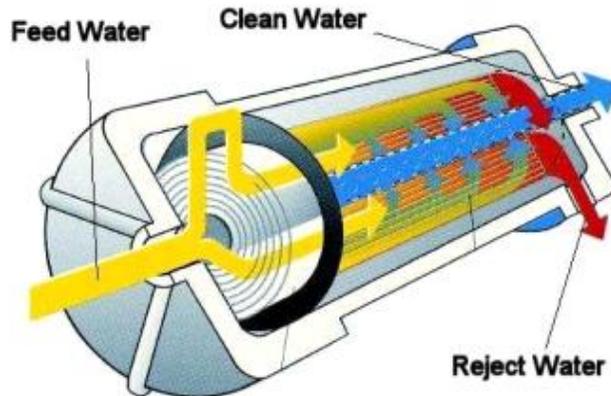


Figura 11 Membrana a spirale avvolta

Nei primi impianti ad osmosi inversa le membrane erano realizzate in acetato di cellulosa, che però è soggetto al deterioramento dovuto all'idrolisi causata dal contatto con l'acqua. Inoltre, l'utilizzo di queste membrane rende necessario anche un accurato controllo e correzione dell'acidità dell'acqua, affinché la membrana non si degradi. Per questi motivi sono state introdotte delle membrane composite, che sono costituite da uno strato attivo in poliammide e da un materiale poroso di supporto. Queste sono chimicamente e fisicamente più stabili delle precedenti, non presentano degradazione per idrolisi, hanno una maggiore resistenza alla carica batterica e sono stabili per un ampio intervallo di valori di pH, compreso tra 3 e 11. Lo svantaggio è che hanno una maggiore tendenza allo sporco e sono più sensibili alla presenza di cloro.

La membrana, qualunque essa sia, è soggetta al deterioramento, allo scaling ed allo sporco. [14]

- **Deterioramento:** La membrana è soggetta al deterioramento operato dagli agenti chimici, come gli ossidanti utilizzati nel processo di pretrattamento. Infatti, la presenza di questi può ossidare la superficie della membrana danneggiandone lo strato attivo. Inoltre, la membrana è sensibile sia a valori di pH troppo alti sia a valori troppo bassi, quindi il controllo e la correzione del pH sono fondamentali per assicurare il funzionamento stabile.
- **Scaling:** Lo scaling della membrana è causato dalla sovrassaturazione di composti inorganici situati nell'acqua di alimentazione dell'impianto come solfati, carbonati e fluoruro di calcio. Questi sali in concentrazione molto elevata precipitano sulla superficie della membrana formando uno strato sottile, che ostacola il flusso di acqua attraverso di essa. Per evitare questo fenomeno è necessario eseguire un adeguato pretrattamento dell'acqua di mare: infatti la precipitazione dei sali viene inibita correggendo l'acidità dell'acqua ed utilizzando degli anticrostanti.

- **Sporcamento:** Lo sporcamento è causato dal trasporto convettivo e diffusivo di particelle sospese o colloidali o dalla crescita biologica sulla membrana, che determinano una certa resistenza al trasporto di massa attraverso di essa, causando un aumento delle perdite di carico e quindi della pressione richiesta. Come già detto questo fenomeno viene inibito dal pretrattamento dell'acqua salata, tuttavia, essendo impossibile rimuovere completamente tutte le particelle, lo sporcamento viene tollerato finché il flusso di massa attraverso la membrana raggiunge il 75% del valore iniziale.

1.5.1.4 Configurazione del campo di membrane

In un impianto ad osmosi inversa non si utilizza una sola membrana, ma più elementi situati all'interno di un contenitore in pressione, detto pressure vessel. Un aspetto importante è la differenza di produzione degli elementi di membrana a seconda della loro posizione all'interno del contenitore. Infatti, lungo il pressure vessel, in seguito alla produzione di acqua dissalata, aumenta la concentrazione di sale dell'acqua di alimentazione. In questo modo le membrane vicine all'ingresso presentano un flusso maggiore, dovuto alla minore pressione osmotica causata dalla minor concentrazione di sale dell'acqua di alimentazione. Le membrane vicine all'uscita, invece, presentano un flusso minore dovuto alla maggiore pressione osmotica, causata dalla maggiore salinità, e alla diminuzione della pressione di alimentazione in seguito alle perdite di carico. Esistono diverse configurazioni del campo di membrane, a seconda della capacità dell'impianto. Di seguito vengono riportate le tre principali configurazioni [14].

- **Configurazione in serie:** più elementi di membrana sono collegati in serie tra loro e posti all'interno dello stesso contenitore. Solitamente il numero di elementi è circa 6-8 ed è limitato dal potenziale di sporcamento dell'acqua di alimentazione e dalle restrizioni sulla pressione massima ammissibile e sulle perdite di carico, che definiscono la lunghezza massima del contenitore. Una configurazione di questo tipo è adatta a bassi valori di capacità.
- **Configurazione in parallelo:** più pressure vessel sono collegati in parallelo. Questa configurazione viene usata in impianti di taglia maggiore, che presentano maggiori portate dell'acqua di alimentazione, per cui essa viene suddivisa tra più pressure vessel in modo da non eccedere il valore massimo di portata imposto per ognuno di essi.
- **Configurazione conica:** il flusso di alimentazione si riduce dall'ingresso all'uscita, in seguito alla produzione di acqua desalinizzata. Se questo scende sotto il valore minimo imposto, allora è utile l'impiego di una configurazione conica in cui il numero di membrane in parallelo viene ridotto dall'ingresso all'uscita, in modo tale da ridurre l'area trasversale di attraversamento dell'acqua di alimentazione in maniera proporzionale al decremento del flusso.

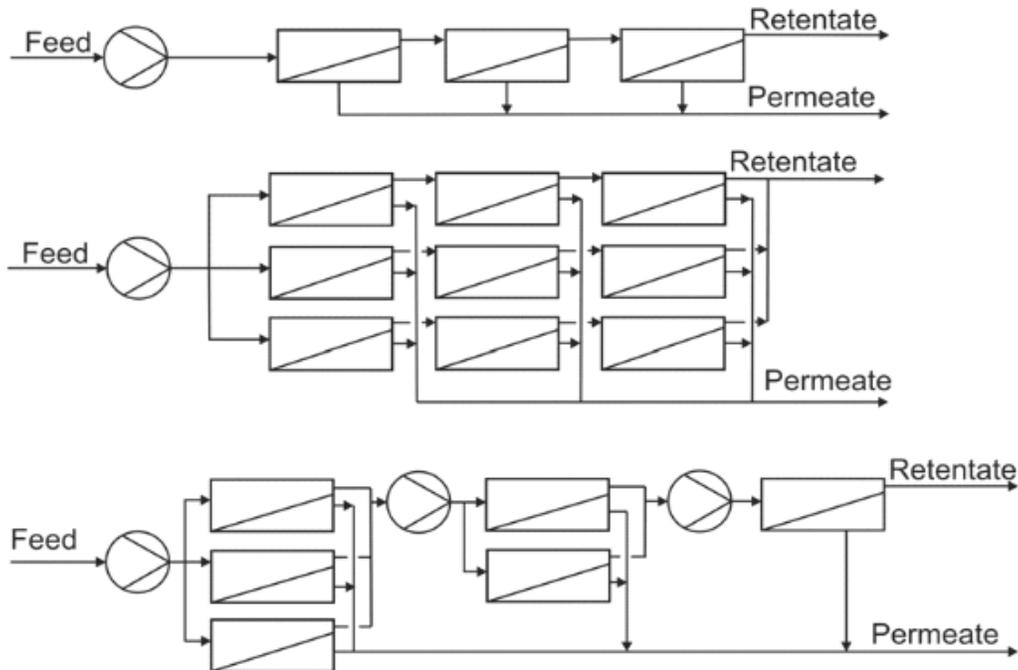


Figura 12 Configurazioni d'impianto: di seguito, configurazione in serie in parallelo e conica

Lungo il contenitore la pressione diminuisce a causa delle perdite di carico e la pressione osmotica aumenta in seguito all'aumento di salinità, pertanto la pressione totale che determina il processo di osmosi inversa diminuisce lungo il pressure vessel. Talvolta è quindi necessario l'utilizzo di pompe intermedie, dette pompe booster, le quali forniscono nuovamente un po' di pressione al flusso di alimentazione affinché la produzione non cali troppo.

I limiti da rispettare nella scelta della configurazione sono la pressione massima ammissibile, definita dal costruttore della membrana per evitare il danneggiamento della stessa, e i valori di flusso massimo e minimo. In particolare, il flusso massimo determina il numero di pressure vessel in parallelo. Si sottolinea che però un flusso maggiore determina anche delle perdite di carico più elevate. [14][10]

1.5.1.5 Sistemi per il recupero dell'energia

Grazie a dispositivi di recente invenzione per recuperare l'energia, il consumo specifico di questi impianti è diminuito molto. Nel processo di osmosi inversa parte dell'acqua pressurizzata contro la membrana permea, mentre la restante è rigettata ad una pressione che è circa quella di ingresso della membrana. Fino a metà del decennio scorso l'energia contenuta nella frazione espulsa (ad alta concentrazione salina) era recuperata attraverso turbine Pelton accoppiate a pompe che prepressurizzavano o contribuivano a pressurizzare parte dell'acqua alimento in ingresso alla membrana con rendimenti del 60-70%. Da qualche anno sono disponibili sul mercato dei sistemi di recupero chiamati pressure exchanger (scambiatori di pressione) [15]. Questa recente tecnologia consente di scambiare energia da un fluido ad alta pressione, in questo caso la salamoia, ad uno a bassa pressione, l'acqua marina di alimento. Un particolare tipo di scambiatore di pressione è il rotary pressure exchanger, in questo dispositivo (Figura 13) un albero permette il movimento di un rotore

cilindrico al cui interno sono presenti dei vani longitudinali, alle estremità due teste collettano entrate e uscite. L'energia di pressione è trasferita direttamente da un fluido all'altro attraverso i canali del rotore, si parla in questo caso di pistone fluido la cui interfaccia grazie alla velocità di rotazione è ben definita e il mescolamento tra i due fluidi è pressoché trascurabile. Durante il funzionamento il fluido da pressurizzare entra in un canale espellendo il fluido che ha ceduto la sua energia nel ciclo precedente, il rotore si porta nella posizione in cui il cilindro fluido da pressurizzare entra in contatto, da un lato con la salamoia ad alta pressione che cede la sua energia all'acqua alimento e viene espulsa, e dal lato opposto con una pressione circa uguale a quella rigettata dalla membrana. L'efficienza di questo dispositivo è notevole e si aggira attorno al 98% [16]. L'installazione di questo dispositivo oltre al recupero di energia permette di ridurre la potenza dell'impianto (o di aumentarne la produzione) e diminuendone le sollecitazioni di allungarne la vita utile [17]. Inoltre, a differenza del sistema Pelton-pompa, funziona in un range molto più ampio sia di pressioni che di portate, ed avendo solo il rotore in movimento invece di accoppiamenti meccanici, risulta oltre che più efficiente anche maggiormente affidabile e durevole. [11]



Figura 13 Rotary pressure exchanger

1.5.1.6 Post-trattamento

L'acqua che permea la membrana presenta caratteristiche non adatte al consumo umano perciò prima di essere accumulata o consegnata alle utenze ha bisogno di alcuni post trattamenti. Per rendere la composizione dell'acqua pari a quella oligominerale sono normalmente necessari i seguenti trattamenti:

- Rimozione del Boro attraverso l'uso di resine selettive. Normalmente sono necessarie due colonne in parallelo per assicurare il funzionamento in continuo perché le resine devono essere periodicamente rigenerate con soda caustica e acido cloridrico
- Rimineralizzazione dell'acqua. L'acqua dopo il processo di osmosi inversa non contiene una quantità sufficiente di sali necessari a renderla potabile, si aggiungono quindi Magnesio e Calcio. L'OMS consiglia una quantità di circa 10 mg/l per il primo e 30 mg/l per il secondo [11]

1.5.2 Elettrodialisi (ED)

L'elettrodialisi è un processo che alterna membrane permeabili rispettivamente a cationi e anioni; si tratta di membrane simili a quelle impiegate per l'osmosi inversa, costituite quindi da una matrice porosa su cui vengono "installati" gruppi attivi funzionali (GAF). Tali GAF hanno cariche fisse, fungendo così da barriera: le membrane cationiche, caricate negativamente, saranno permeabili ai cationi (respingendo quindi gli anioni) e viceversa le anioniche. Utilizzando batterie di membrane cationiche ed anioniche alternate attraversate da un flusso di corrente (Figura 14), si avrà che:

- i cationi tenderanno ad andare verso l'anodo, fino ad incontrare una membrana anionica che li blocca;
- gli anioni tenderanno ad andare verso il catodo finché verranno bloccati da una membrana cationica.

In questo modo, ovvero accostando batterie di membrane, si creano celle di concentrazione (scarti, detti concentrati) e celle di diluizione (acqua depurata, detta dialisato). Gli elettrodi (anodo e catodo) vengono rivestiti, solitamente in platino, per resistere a forti corrosioni. [18]

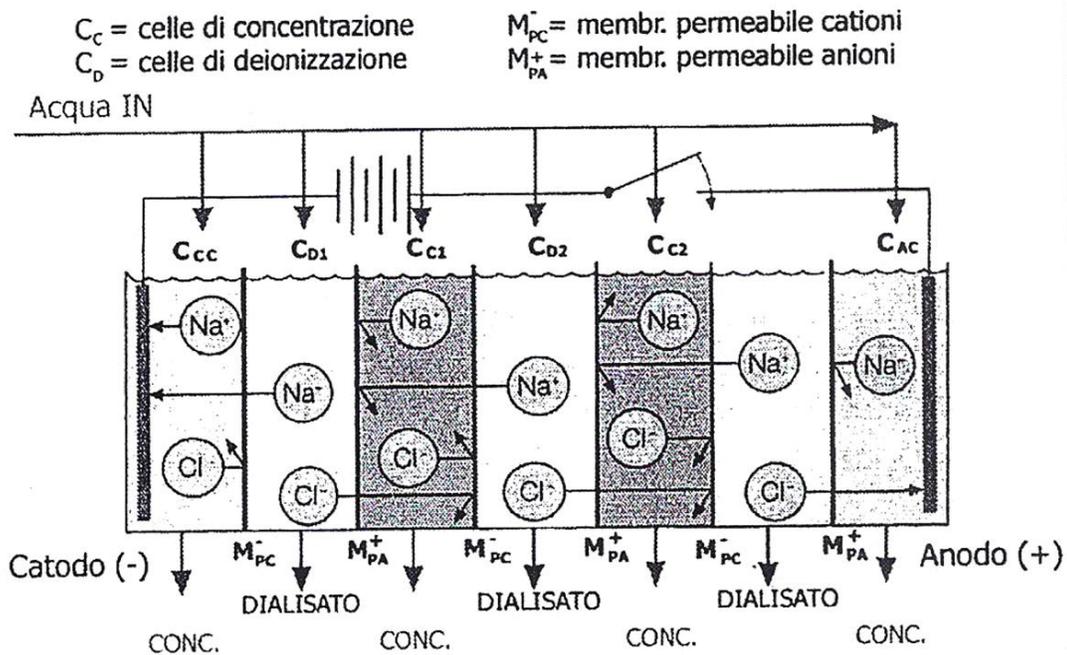


Figura 14 Schema semplificato del funzionamento di un modulo di elettrodialisi

1.5.3 Osmosi Avanzata (FO)

Come nell'osmosi inversa si utilizza una membrana semipermeabile, ma l'acqua viene estratta da una soluzione contenente NH_3 e CO_2 chiamata "draw solution" che impedisce il fluire dell'acqua trattata verso la soluzione salina. La "draw solution" viene poi fatta passare attraverso un sistema di recupero che separa, attraverso un riscaldamento intorno a 65°C , la soluzione chimica (che viene riciclata) dall'acqua che costituisce il prodotto finale. A differenza dell'osmosi inversa qui l'acqua fluisce, sotto l'azione della pressione osmotica naturale, da una regione a minor concentrazione di soluto, minor potenziale osmotico e minor entropia verso una regione a maggior concentrazione di soluto, maggior potenziale osmotico e maggiore entropia.

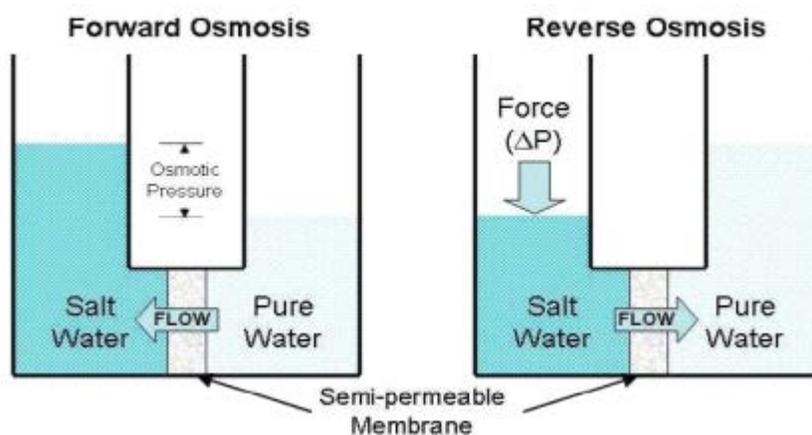


Figura 15 Diverso funzionamento dell'Osmosi avanzata e dell'Osmosi inversa

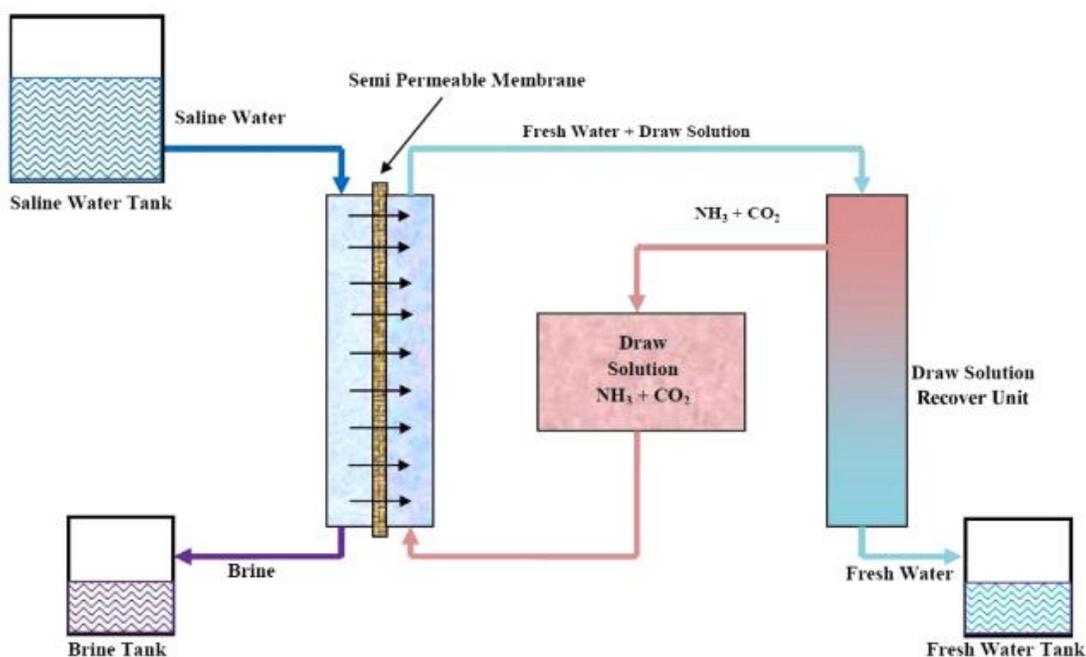


Figura 16 Schema generale di un processo a Osmosi avanzata

Questi processi hanno alcuni vantaggi rispetto a quelli ad osmosi inversa:

- minor pressione idraulica che porta a minor fouling (incrostazioni) e minori consumi energetici;
- alta pressione osmotica a cui segue maggior flusso d'acqua e maggior capacità di conversione;
- mancanza di pretrattamenti chimici;
- minor scarico della salamoia.

La difficoltà tecnologica di sviluppare membrane con queste caratteristiche performanti ne ha, al momento, limitato lo sviluppo. Il primo impianto al mondo di osmosi avanzata fu installato in Oman solo nel 2012 e altri successivamente negli USA. Ciò nonostante questa tecnica è vista con favore per un possibile sviluppo futuro ed è destinata ad imporsi a livello commerciale nei prossimi anni. [8]

1.6 Stato attuale dei processi di desalinizzazione

L'International Desalination Association (IDA) ha registrato la presenza di oltre 18000 impianti di dissalazione presenti in tutto il mondo, di cui oltre la metà nel Medio Oriente con l'Arabia Saudita leader mondiale, per una capacità superiore a 80 milioni di m³ al giorno. In Figura 17 si nota come la capacità installata sia aumentata notevolmente negli ultimi 10-15 anni.

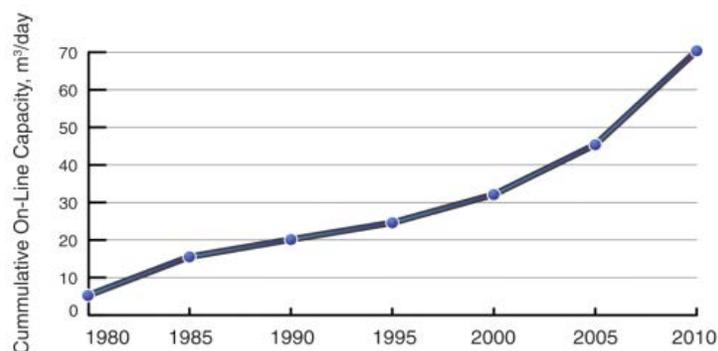


Figura 17 Aumento capacità di acqua dissalata nel mondo nel corso degli anni

Oltre all'Arabia Saudita, anche gli Emirati Arabi, USA, Spagna e Cina hanno i maggiori impianti di desalinizzazione; inoltre dal 2002 anche l'India e Israele hanno visto crescere in modo significativo la loro capacità. I principali produttori di acqua dissalata sono gli Emirati Arabi Uniti, l'Arabia Saudita e il Kuwait; si tratta infatti di zone aride dove la domanda di acqua potabile è sempre stata superiore all'effettiva disponibilità. Tuttavia, la continua crescita della popolazione mondiale ha portato alla necessità di disporre di una maggior quantità di acqua anche nelle zone dove il clima è più favorevole, ma, a causa di continui prelievi o di attività antropiche inquinanti, le falde acquifere o le acque superficiali non sono più completamente idonee alla produzione di acqua destinata al consumo umano. Come si vede in Figura 18, il processo di dissalazione oggi più utilizzato è l'osmosi inversa (Reverse Osmosis, RO), con una capacità di acqua prodotta maggiore del 60%, mentre al secondo posto troviamo il processo a flash a stadi multipli (Multi-Stage Flash Distillation, MSF).

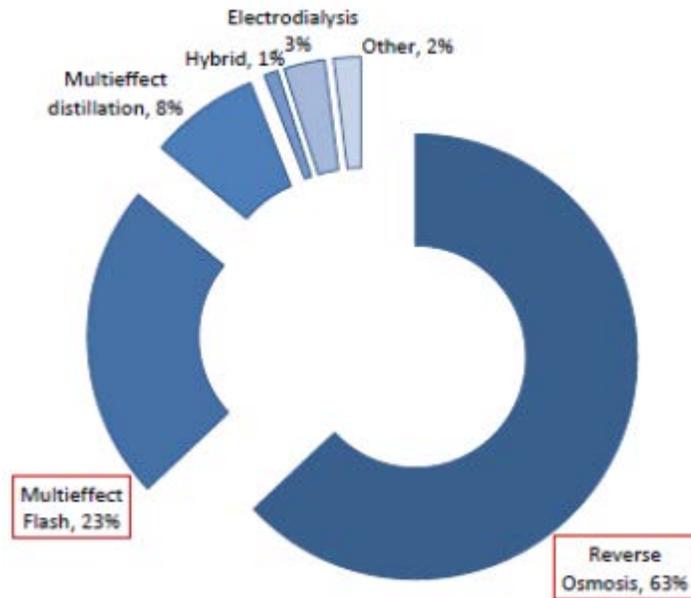


Figura 18 Processi di desalinizzazione più utilizzati nel mondo

Approssimativamente il 60% degli impianti esistenti sono alimentati ad acqua di mare, come visibile in Figura 19. [8]

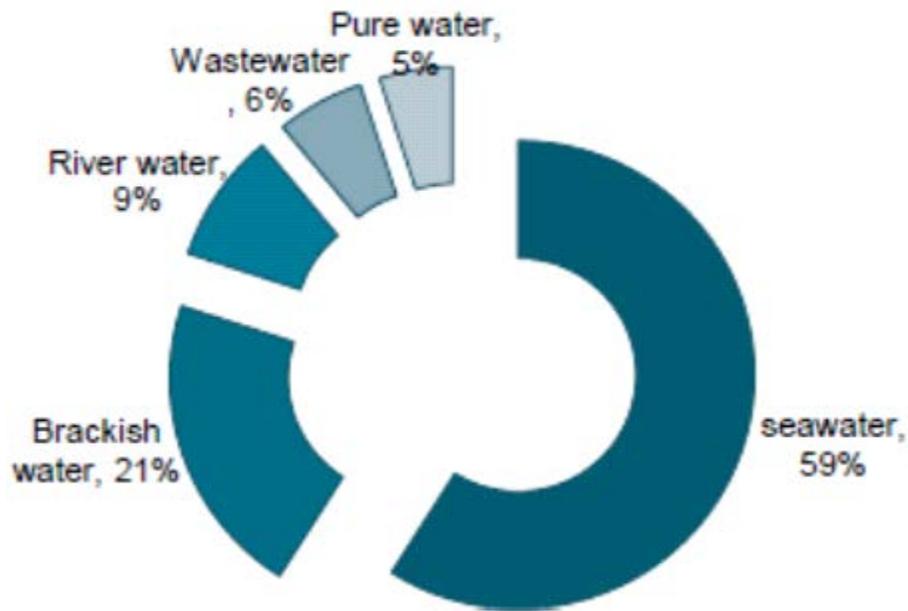


Figura 19 Alimentazioni più comuni per gli impianti di desalinizzazione

1.7 Impianti di desalinizzazione alimentati a energia rinnovabile

Intorno a 10000 tonnellate di prodotti petroliferi vengono utilizzati ogni anno per produrre 1000 m³/d di acqua desalinizzata contribuendo così alle emissioni di gas serra (Green House Gas, GHG) [19]. Questo aspetto ha portato a studiare nuovi metodi di alimentazione per gli impianti di dissalazione, utilizzando le fonti rinnovabili disponibili. Sebbene i sistemi di desalinizzazione alimentati a fonti rinnovabili non possano competere in termini di costo di acqua prodotta, essi possono venire applicati in particolari aree del mondo ed è previsto che, in un recente futuro, tali soluzioni diventino sempre più realizzabili. Le fonti energetiche rinnovabili comunemente sviluppate per la desalinizzazione sono il solare (per un 57%), l'eolico, il geotermico e la combinazione ibrida solare/eolico. Secondo le più recenti statistiche [19] solo l'1% dell'acqua desalinizzata deriva da processi alimentati da fonti rinnovabili. La decisione su quale tipo di risorsa utilizzare deve considerare aspetti economici, ambientali, di sicurezza e di disponibilità della stessa. Le regioni nel mondo dove maggiormente si presenta il problema della scarsità di acqua potabile sono spesso anche quelle con i maggiori valori di intensità di radiazione solare. Per questa ragione è da ritenersi interessante e promettente pensare ad un accoppiamento tra fonte solare e sistemi di dissalazione tradizionali, considerando anche i grandi consumi energetici di quest'ultimi. Un ulteriore vantaggio della tecnologia di desalinizzazione con solare è che il picco dell'energia solare si presenta durante le stagioni estive, nelle quali è più alta anche la domanda di acqua. L'energia solare può essere convertita in energia termica usando i cosiddetti solar stills o i collettori termici; oppure può essere convertita in energia elettrica tramite pannelli fotovoltaici o con l'uso di impianti solari di potenza. I sistemi di desalinizzazione con il solare si dividono in sistemi diretti e sistemi indiretti (Figura 20). I primi usano l'energia solare per produrre acqua distillata direttamente nei collettori sfruttando l'effetto serra. I secondi, invece, accoppiano i vari sistemi di captazione della radiazione solare con i sistemi di desalinizzazione tradizionali, quindi l'energia solare è usata per produrre calore e/o energia elettrica da fornire ad uno degli impianti descritti precedentemente. [8]

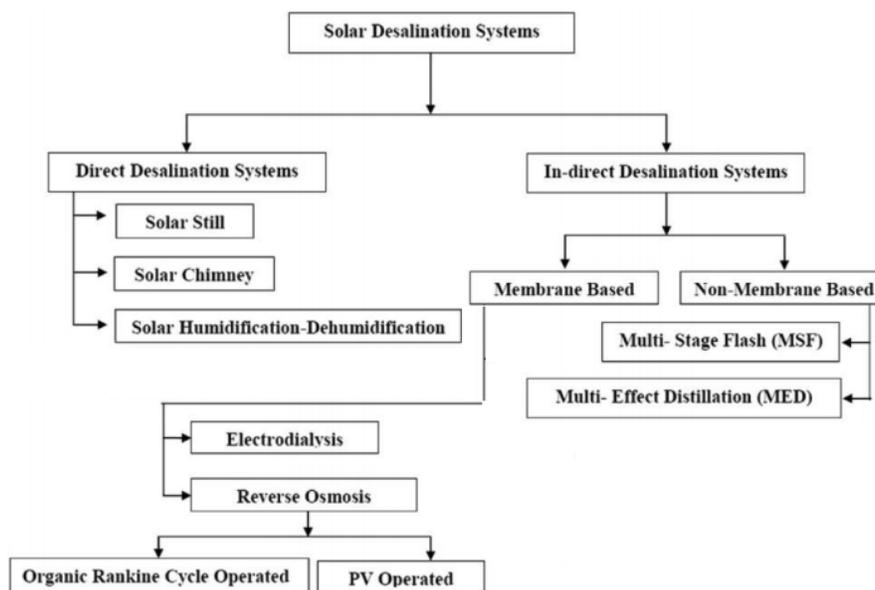


Figura 20 Classificazione dei processi di desalinizzazione alimentati con il solare

1.7.1 Sistemi di desalinizzazione diretta

1.7.1.1 Solar still

Un solar still è costituito da una vasca poco profonda con una copertura in vetro, al cui interno è presente l'acqua salata. La radiazione solare viene trasmessa attraverso la copertura in vetro e rimane intrappolata all'interno della vasca, determinando l'evaporazione dell'acqua. Successivamente il vapore formato, venendo a contatto con la superficie fredda di vetro, condensa su di essa e l'acqua dolce così prodotta viene raccolta. Generalmente, tale tecnologia diventa competitiva e ben si adatta per zone remote e rurali dove è richiesta una modesta quantità di acqua per il consumo umano. Infatti, richiedendo una notevole superficie per i collettori solari, non è adatta localizzarla vicino a città, dove lo spazio scarseggia. [8]

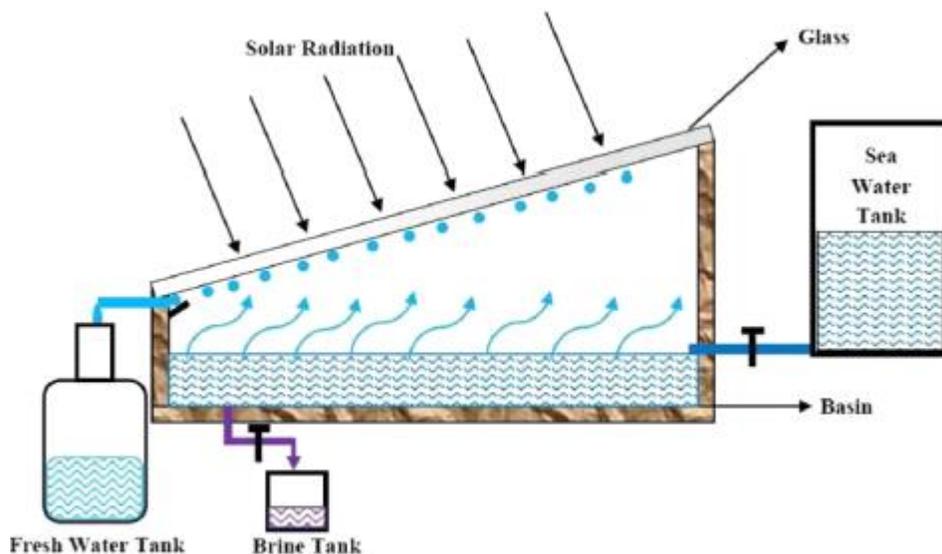


Figura 21 Schema di una solar still

1.7.1.2 Desalinizzazione con umidificazione-deumidificazione (Desalination with Humidification-Dehumidification, HD)

Nei sistemi solar still oltre che il problema della corrosione e incrostazione, si hanno in un unico volume le fasi di riscaldamento, evaporazione e condensazione dell'acqua che provocano inefficienze termiche. Invece, i processi con HD utilizzano componenti distinti per ognuno dei processi termici richiesti, permettendo così una maggiore flessibilità di gestione. Qui l'acqua di mare, preriscaldata dai collettori solari, viene immessa in una colonna di distillazione, dove riscalda ed umidifica dell'aria fatta passare in controcorrente (si sfrutta la proprietà dell'aria, la quale, approssimativamente, raddoppia la sua umidità specifica per ogni incremento di 10°C di temperatura). L'aria finisce in un condensatore nel quale viene deumidificata e da dove si estrae l'acqua dolce richiesta. Il calore di condensazione viene recuperato per favorire l'evaporazione dell'acqua dei successivi cicli.

Le configurazioni possibili sono quattro:

- ciclo ad acqua aperto e ad aria chiuso;
- ciclo ad acqua chiuso e ad aria chiuso;
- ciclo ad acqua aperto e ad aria aperto;
- ciclo ad acqua chiuso e ad aria aperto.

In Figura 22 sono visibili tutte e quattro le configurazioni in un'unica rappresentazione:

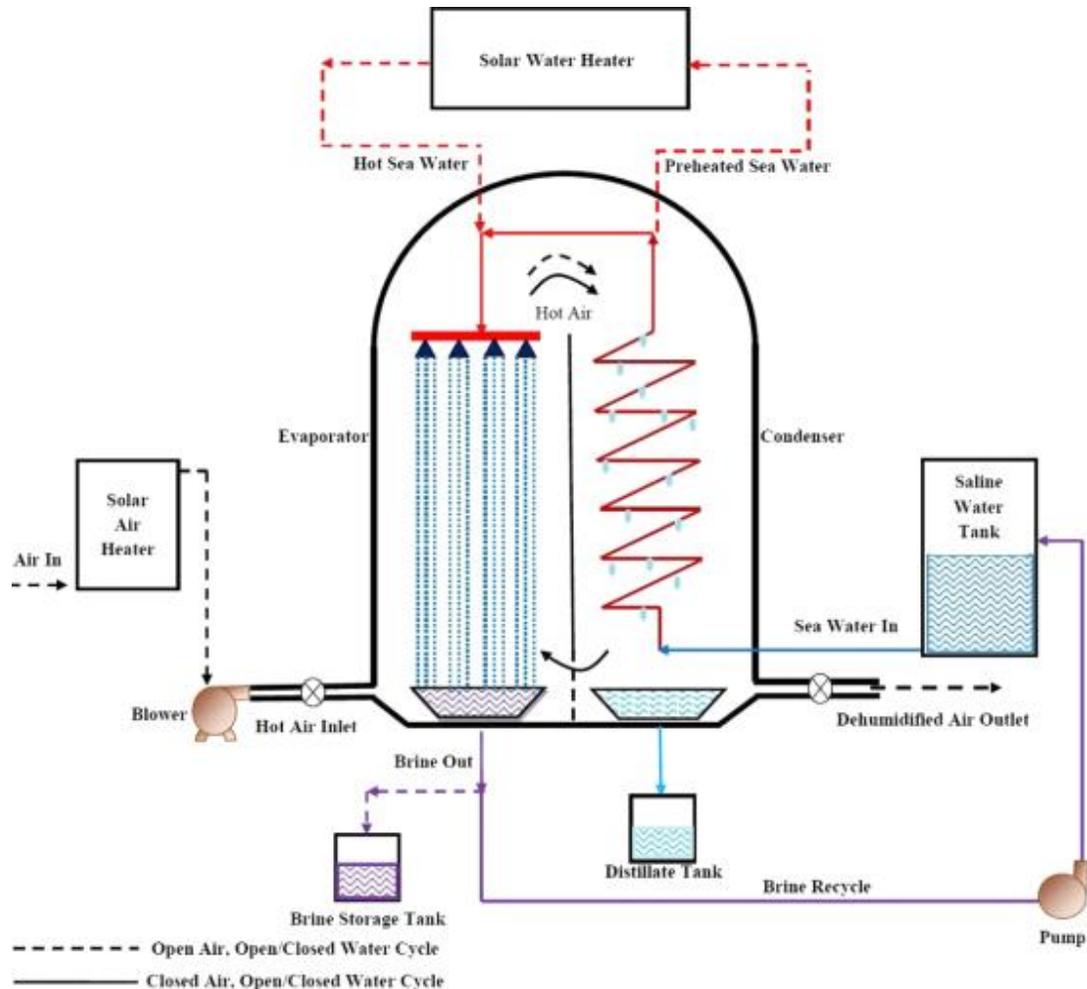


Figura 22 Configurazioni di un sistema ad umidificazione-deumidificazione

Per questi processi si richiede calore a bassa temperatura (intorno a 85°C) ed elettricità per pompare l'acqua salata e per muovere l'aria. Rispetto ai Solar Still, con questa configurazione si avranno maggiori costi di installazione e di manutenzione e maggiore produzione di acqua depurata. [8]

1.7.1.3 Solar Chimney

Questa tecnica consiste nel convertire l'energia solare termica in energia cinetica e quest'ultima in energia elettrica utilizzando un turbogeneratore. L'acqua salina viene fatta evaporare grazie ai collettori solari presenti e fatta passare attraverso una turbina che genera energia elettrica. Successivamente passa attraverso un condensatore che produce l'acqua dolce desiderata.

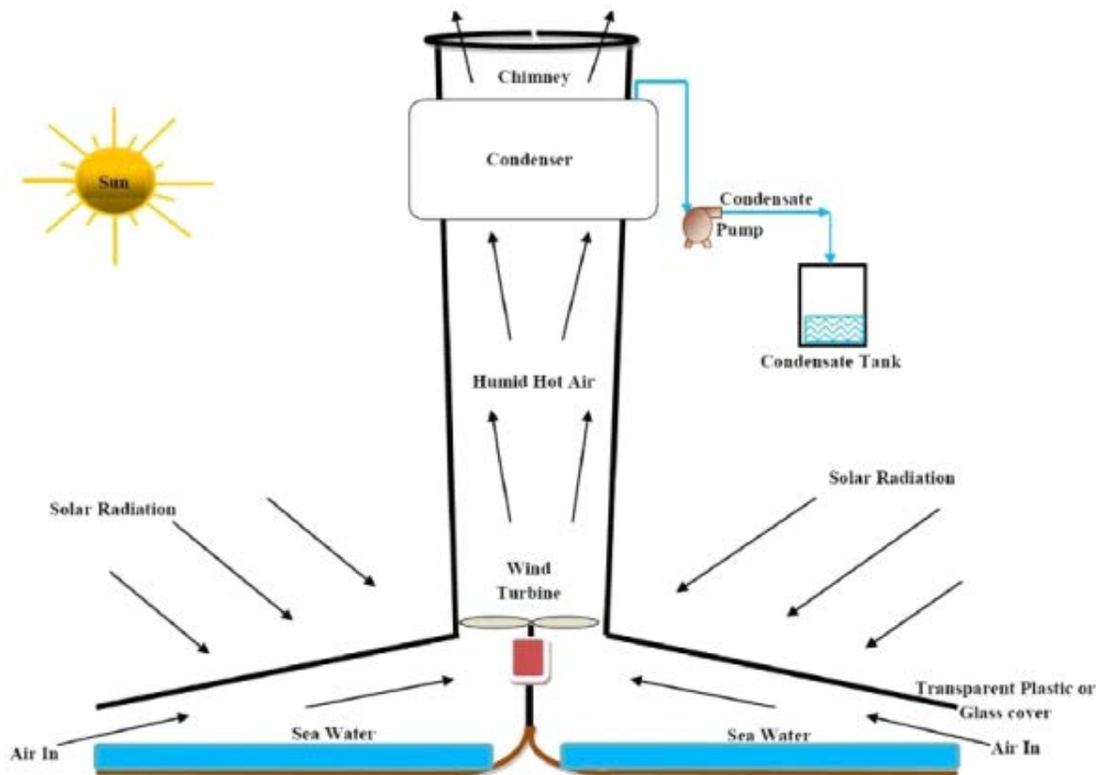


Figura 23 Schema di una Solar Chimney

Anche questa tecnologia richiede una grande superficie a causa delle elevate dimensioni delle strutture pesanti necessarie ed ha elevati costi d'investimento, ma con bassi costi di produzione di acqua. [8]

1.7.2 Sistemi di desalinizzazione indiretta

I Sistemi di desalinizzazione indiretta si suddividono in due grandi gruppi:

- Sistemi termici
- Sistemi a membrana

1.7.2.1 Sistemi termici

1.7.2.1.1 Impianti MSF e MED alimentati da un campo solare a concentrazione

Grazie allo sviluppo delle tecnologie a concentrazione solare (Concentrated Solar Power, CSP) un accoppiamento di queste con i processi di desalinizzazione (come MED e MSF) appare sempre più possibile sia tecnicamente che economicamente. [8] Di seguito vengono riportati gli schemi di un impianto MSF alimentato da un campo solare a concentrazione (Figura 24) e lo schema di un impianto MED alimentato da un campo solare a concentrazione (Figura 25).

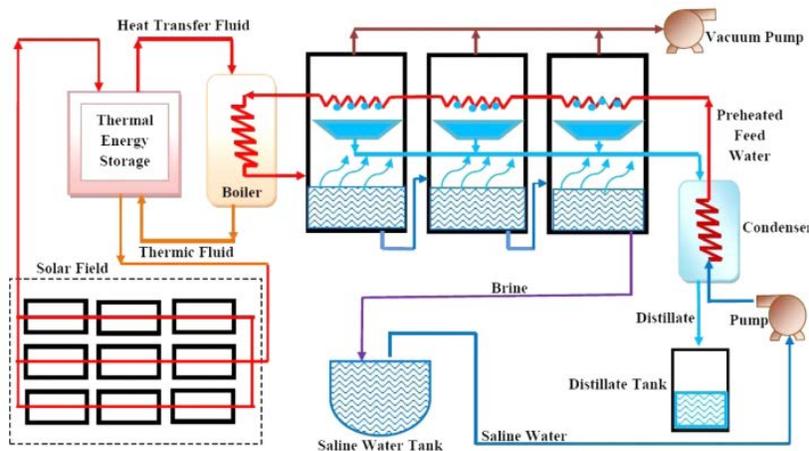


Figura 24 Schema di un impianto MSF alimentato da un campo solare a concentrazione

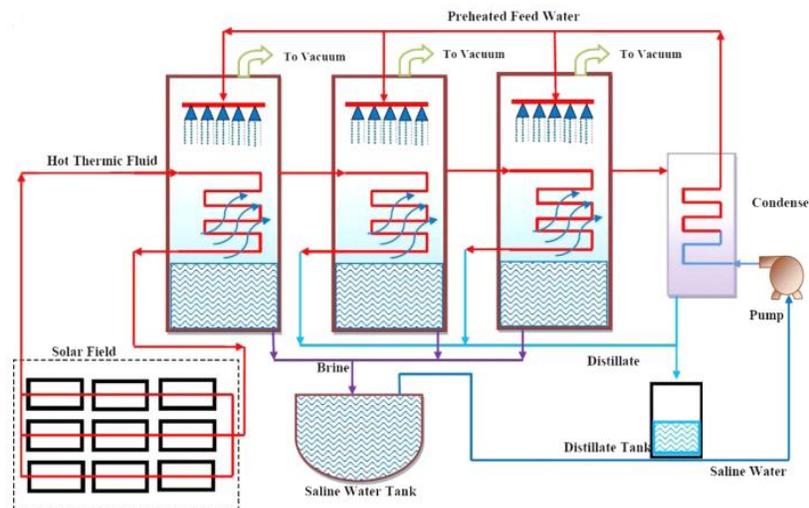


Figura 25 Schema di un impianto MED alimentato da un campo solare a concentrazione

1.7.2.1.2 Solar Ponds

I solar ponds sono ampi bacini di acqua della profondità di 2-3 metri e sono costituiti da tre strati. Lo strato superficiale è uno strato di circa mezzo metro di acqua dolce o di mare a salinità normale (0-35 g/kg) e a temperatura ambiente (20-25°C). Lo strato più profondo è costituito da acqua ad alta salinità (200-250 g/kg) e ad alta temperatura (80-90°C). A separare queste due zone si trova una zona caratterizzata da un gradiente di concentrazione di sale decrescente dal basso verso l'alto. L'acqua nella zona del gradiente salino non può salire perché l'acqua che le sta sopra ha un contenuto salino inferiore ed è perciò più leggera. Per la stessa ragione l'acqua degli strati alti non può scendere, perché l'acqua dello strato inferiore ha un contenuto salino maggiore ed è più pesante, ed anche se la sua densità decresce al crescere della temperatura, resta sempre più densa dell'acqua degli strati superiori. [20]

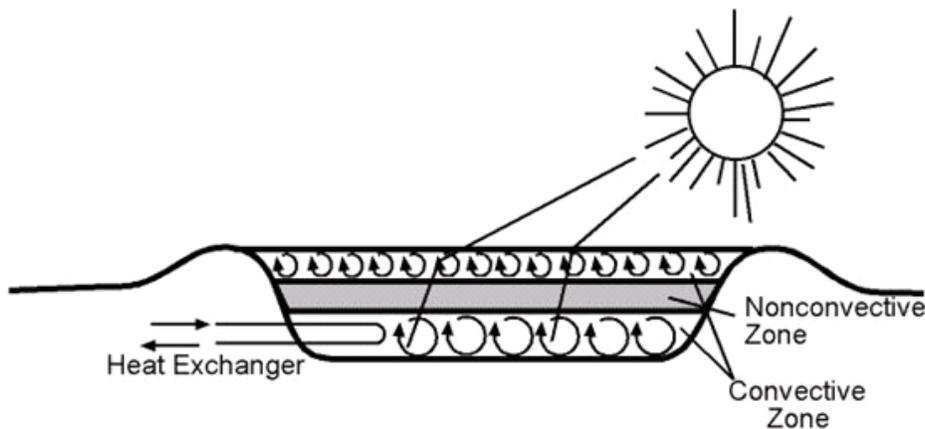


Figura 26 Schema di funzionamento di un solar pond

L'elevata quantità di energia termica che viene accumulata nei solar ponds, può essere sfruttata, in modo continuo, per le operazioni negli impianti MED, MSF o per generare energia elettrica tramite ciclo Rankine per alimentare gli impianti RO,ED, di conseguenza gli stagni solari non fanno parte di una tipologia di processi di dissalazione vera e propria, ma sono delle apparecchiature che si possono integrare ai processi sopra menzionati (svolgono, ad esempio, una funzione simile a quella dei collettori solari) Un vantaggio legato al grande accumulo presente è quello di permettere di far funzionare gli impianti anche nei momenti di assenza di insolazione e di notte. [8]

1.7.2.2 Sistemi a membrana

1.7.2.2.1 Osmosi Inversa

L'Osmosi Inversa richiede solo un consumo di energia elettrica, si può alimentare con il solare fotovoltaico con l'utilizzo o meno di batterie come accumulo energetico. In questo caso l'energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici, convertita in corrente alternata tramite un inverter, è direttamente utilizzata per azionare le pompe per portare in pressione l'acqua prima di entrare nelle membrane semipermeabili (Figura 27).

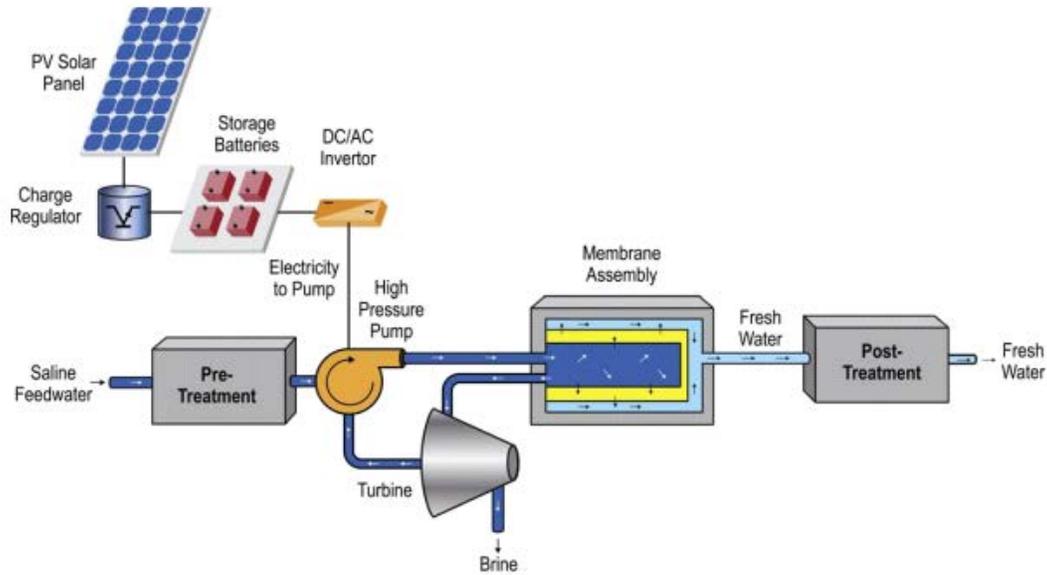


Figura 27 Schema di un impianto ad osmosi inversa alimentato da un campo fotovoltaico

Altra possibilità è quella di utilizzare il lavoro meccanico sviluppato da un ciclo a fluido organico, alimentato da collettori solari, per far funzionare le pompe. In questo caso l'impianto occupa una superficie molto più estesa rispetto al caso precedente a causa della presenza di un circuito termodinamico composto da accumulo termico, boiler, turbina e condensatore, ma si può raggiungere il doppio obiettivo di produzione di energia elettrica e acqua desalinizzata (Figura 28). [8]

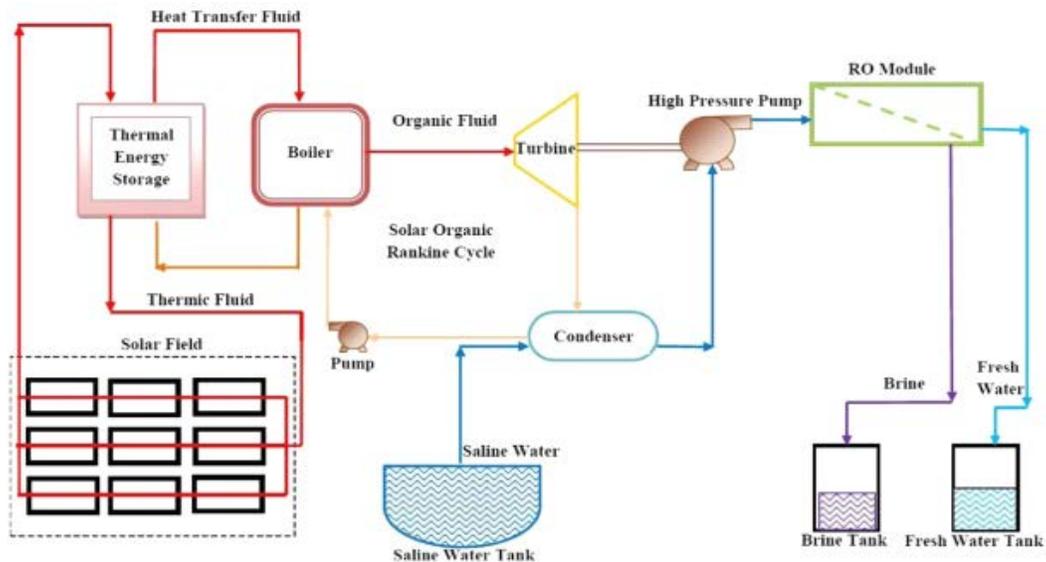


Figura 28 Schema impianto RO accoppiato ad un ciclo organico alimentato da un campo solare a concentrazione

1.7.2.2 Elettrodialisi

In questo caso si possono utilizzare dei pannelli fotovoltaici per produrre l'energia elettrica necessaria da inviare alla membrana per attivare il processo, senza utilizzare inverter in quanto l'alimentazione è in corrente continua. Invece, come visibile in Figura 29, l'inverter si rende necessario per l'alimentazione delle pompe che permettono il passaggio dell'acqua dai sistemi di pretrattamento fino alle membrane. Questo tipo di impianto può essere conveniente per regioni con poca disponibilità di energia elettrica, con mancanza di accesso a combustibili a basso costo o per aree con abbondanza di irradiazione solare. Poiché questa soluzione è spesso applicata in regioni ad alta insolazione, la vita utile delle batterie di accumulo elettrochimiche è sensibilmente ridotta a causa delle elevate temperature a cui sono sottoposte. Quindi la manutenzione di questi impianti può richiedere frequenti interventi. [8]

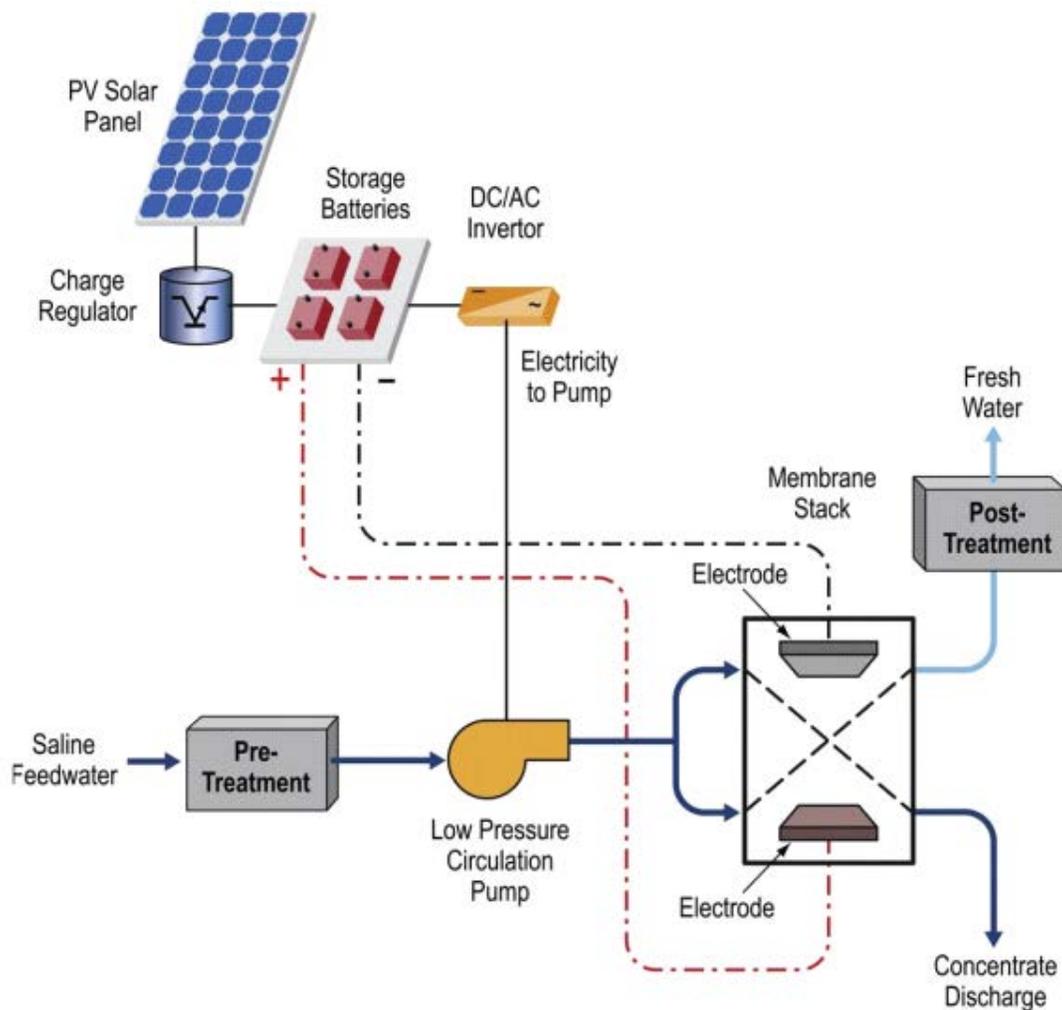


Figura 29 Schema di un impianto ED alimentato da un campo fotovoltaico

1.7.3 Considerazione sugli impianti di desalinizzazione alimentati a energia rinnovabile

Andando a considerare i soli sistemi di desalinizzazione indiretti alimentati con fonti rinnovabili si nota che, degli 87 impianti presenti al mondo, il 52% sono basati sulla tecnologia RO, il 13% su quella MSF e il 9% su quella ED.

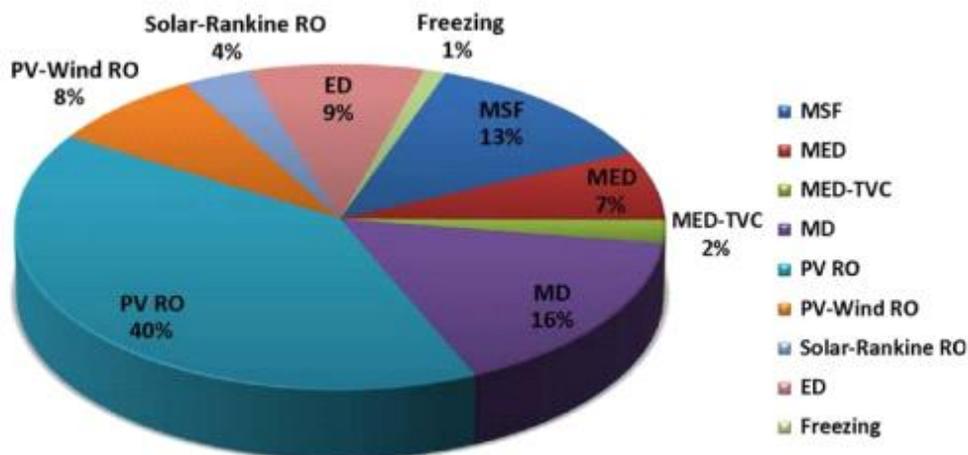


Figura 30 Processi di desalinizzazione alimentati in modo indiretto con il solare

Oltre all'utilizzo dell'energia prodotta dal solare anche la potenza elettrica generata dalle turbine eoliche può essere utilizzata nei processi RO, ED oppure nelle unità con compressione di vapore. Anche l'eolico, come il solare, ha il problema dell'intermittenza della generazione, per cui l'integrazione con altre fonti o con batterie di accumulo è necessaria per garantire condizioni operative continuative. Un impianto di desalinizzazione, accoppiato ad un parco eolico, può funzionare da storage nei casi in cui la generazione di elettricità supera la domanda, infatti si può pensare di accumulare l'acqua desalinizzata nei periodi di maggior disponibilità della risorsa, per poi utilizzarla nei momenti in cui la produzione cala o è assente. Le caratteristiche complementari di eolico e solare rendono il loro accoppiamento una soluzione attrattiva, in quanto, nella maggioranza dei casi, in assenza dell'una c'è l'altra. [8]

Capitolo II

Studio e attuazione del modello per l'impianto di desalinizzazione

2.1 Collocazione dell'impianto

Per poter realizzare il modello dell'impianto di desalinizzazione la prima cosa da fare è quella di individuare un possibile luogo dove installarlo. In questa tesi si è scelto di localizzarlo al largo delle coste dell'Africa Settentrionale, precisamente sull'isola di Sal, una delle dieci isole che compongono l'arcipelago di Capo Verde. Questi luoghi, a causa delle poche precipitazioni, sono particolarmente sensibili alla carenza d'acqua, soprattutto durante la stagione estiva a causa del flusso turistico. Nell'alta stagione, infatti, le riserve d'acqua presenti nell'isola non sono sufficienti a coprire il fabbisogno idrico degli abitanti e dei villeggianti e a causa di questa mancanza si rende necessario l'importazione di serbatoi d'acqua, il cui costo però è molto elevato, maggiore di 5 €/m³. Per questo motivo, essendo delle isole distanti 500 km dalla costa del Senegal, grazie alla grande riserva d'acqua salata disponibile, potrebbe essere più conveniente l'istallazione di un impianto di desalinizzazione in grado di funzionare con energia rinnovabile come il solare e l'eolico, che in questi luoghi sono ampiamente disponibili, in modo da produrre una quantità d'acqua tale da soddisfare la domanda idrica dell'isola ad un costo specifico più basso di quello sostenuto per l'importazione della risorsa.

2.2 Layout dell'impianto

Lo schema che si vuole studiare è riportato in Figura 31.

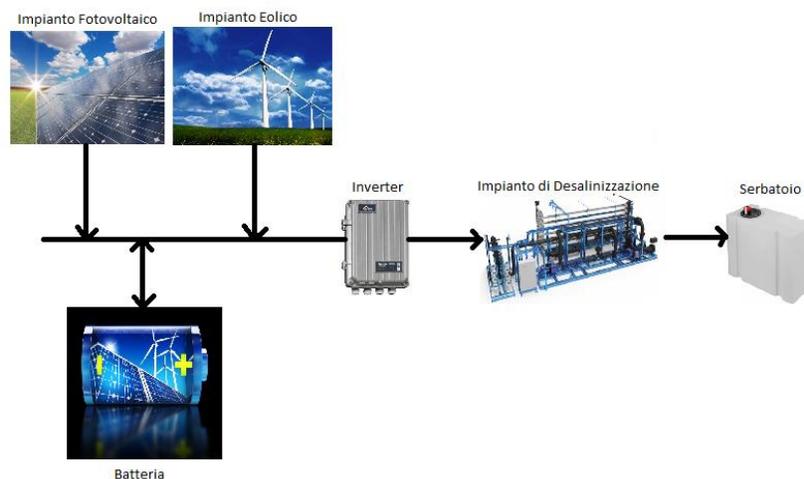


Figura 31 Schema dell'impianto per la desalinizzazione [21][22][23][24][27][28]

Il progetto analizzato è costituito da un impianto fotovoltaico e uno eolico per la produzione dell'energia elettrica. A causa dell'aleatorietà delle fonti rinnovabili scelte, si è deciso di inserire una batteria, necessaria per l'accumulo di energia prodotta in eccesso e utilizzabile successivamente nel caso in cui la potenza prodotta dagli impianti di generazione non sia sufficiente a soddisfare la richiesta energetica. Un inverter è posto prima di un impianto di desalinizzazione per poter convertire la corrente da continua ad alternata. Per quanto riguarda la tecnologia studiata in questa tesi per la dissalazione si è scelta l'osmosi inversa, in quanto essa presenta un modesto consumo specifico di energia e si adatta bene all'accoppiamento con impianti alimentati da energia rinnovabile. Infine, all'uscita del dissalatore è stato posto un serbatoio per immagazzinare l'acqua desalinizzata per non avere una produzione della risorsa contemporanea con la richiesta.

2.3 Domanda idrica e funzionamento di ogni componente

2.3.1 Domanda idrica

La richiesta oraria d'acqua da parte degli utenti dell'isola varia in base al numero di persone presenti e dal periodo considerato in un anno. Gli utenti richiedenti sono suddivisi in due categorie:

- Residenti: numero costante di persone presenti sull'isola (35000 persone)
- Turisti: numero variabile di persone durante l'anno in base alla stagionalità

Nell'alta stagione il numero di turisti è molto più elevato rispetto alla bassa stagione, questo comporta un incremento della domanda idrica.

Per quanto riguarda il consumo specifico d'acqua, anch'esso varia in base alla categoria delle persone e dal periodo considerato. Tutti le relazioni riportate di seguito fanno riferimento al caso di studio descritto negli articoli [29] e [10]. Con i dati riguardanti la popolazione e il consumo specifico giornaliero viene calcolato il consumo totale giornaliero di acqua mediante la seguente relazione:

$$D_{WD} = (R_P \cdot R_{WC}) + (S_P \cdot S_{WC})$$

dove D_{WD} è il consumo totale giornaliero di acqua [m^3 /giorno], R_P è il numero di residenti [persone], S_P è il numero di turisti [persone], R_{WC} è il consumo specifico giornaliero di acqua da parte dei residenti [m^3 /giorno/persona] e S_{WC} è il consumo specifico giornaliero di acqua da parte dei turisti [m^3 /giorno/persona]. I dati per il calcolo della domanda totale giornaliera di acqua variano mensilmente, quindi si ottengono dodici valori di D_{WD} , uno per ogni mese dell'anno.

Per la determinazione della domanda oraria di acqua si utilizzano le curve orarie di consumo normalizzato riportate in Figura 32, una per i mesi invernali e una per quelli estivi. Ad ogni ora del giorno corrisponde una percentuale W_{DP} del consumo totale giornaliero, quindi la domanda oraria di acqua H_{WD} viene calcolata con la seguente relazione:

$$H_{WD} = W_{DP} \cdot D_{WD}$$

Con i dati riportati precedentemente, una volta stabilito il numero di residenti, è possibile calcolare i valori di portata oraria di acqua richiesta per il giorno tipo di ogni mese. Ipotizzando che l'andamento orario giornaliero sia uguale per ogni giorno dello stesso mese, si ricava l'andamento orario della domanda di acqua per un anno intero.



Figura 32 Curve orarie normalizzate della domanda di acqua

2.3.2 Impianto Fotovoltaico

Le equazioni riportate di seguito, consentono di calcolare la produzione di potenza elettrica in funzione della disponibilità della radiazione solare.

La potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico è data dalla relazione:

$$P_{PV} = \eta_g \cdot N_{PV} \cdot A_m \cdot G_t$$

P_{PV} rappresenta la potenza prodotta [kW], η_g il rendimento globale, N_{PV} il numero di moduli fotovoltaici, A_m l'area di un modulo fotovoltaico [m^2] e G_t l'irradianza globale incidente sul piano in cui giacciono i moduli fotovoltaici [kW/m^2].

La potenza prodotta da un modulo fotovoltaico dipende da molteplici fattori, quali l'irradianza incidente sul modulo stesso, la temperatura delle celle e la distribuzione dell'irradiazione monocromatica. Dunque, per definire univocamente le prestazioni di un modulo fotovoltaico, la potenza di picco e il rendimento vengono definiti in condizioni standard.

Le condizioni standard riportate nella norma IEC 60904-3 sono le seguenti:

- Irradianza globale GSTC pari a 1000 W/m^2 ;
- Temperatura di cella pari a 25°C ;
- Spettro solare AM 1.5

Con riferimento a tali condizioni la potenza nominale di un singolo modulo e quella dell'intero impianto fotovoltaico sono descritte dalle relazioni:

$$P_{PV,inst,1\ modulo} = \eta_{STC} \cdot A_m \cdot G_{STC}$$

$$P_{PV,inst} = N_{PV} \cdot P_{PV,inst,1\ modulo}$$

Tuttavia, l'impianto fotovoltaico durante il suo funzionamento è soggetto a condizioni operative diverse da quelle standard, pertanto il rendimento subisce delle variazioni rispetto a quello standard secondo la seguente relazione:

$$\eta_g = \eta_{STC} \cdot \eta_{PT} \cdot [1 - \beta_t(T_c - T_{rif})]$$

dove η_{STC} è il rendimento in condizioni standard, η_{PT} è il rendimento del dispositivo MPPT (maximum power point tracking) per l'individuazione del punto di lavoro di massima potenza, β_t è il coefficiente di riduzione della potenza dovuto alla temperatura che per il silicio è $0.004 \div 0.006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, T_c è la temperatura della cella e T_{rif} è la temperatura di riferimento della cella pari a 25°C .

La temperatura della cella viene calcolata in funzione della temperatura nominale operativa della cella, NOCT, che è definita come la temperatura raggiunta dalle celle in un modulo che opera in condizioni di circuito aperto nella seguente modalità operativa standardizzata:

- Irradianza globale sulla superficie pari a 800 W/m^2 ;
- Temperatura ambiente di 20°C ;
- Velocità del vento parallelo al modulo di 1 m/s ;
- Tutti i lati del modulo sono esposti al vento

In condizioni operative diverse la temperatura della cella si ricava mediante la seguente relazione:

$$T_c = T_{aria} + G_t \cdot (NOCT - 20) / 800$$

dove T_{aria} è la temperatura dell'aria e G_t è l'irradianza globale sulla superficie del modulo. In questa relazione le temperature devono essere espresse in $[^\circ\text{C}]$, mentre l'irradianza deve essere espressa in $[\text{W/m}^2]$.

La variabile di output di questo sistema di equazioni è la potenza generata dall'impianto fotovoltaico P_{PV} , le altre variabili invece sono gli input. L'irradianza globale G_t e la temperatura dell'aria T_{aria} sono variabili climatiche e perciò dipendono dalla zona in cui l'impianto è installato. Le variabili A_m , η_{STC} , η_{PT} , β_t , NOCT, $P_{PV,inst,1\ modulo}$ dipendono dalle caratteristiche del modulo fotovoltaico considerato, mentre il numero dei moduli N_{PV} è determinato dalla potenza installata dell'intero impianto.

2.3.3 Impianto Eolico

La potenza fornita dall'impianto eolico dipende dalla velocità del vento che mette in rotazione la turbina. La tipologia di turbina eolica che viene considerata è quella con velocità di rotazione variabile, la quale genera potenza quando la velocità del vento è compresa tra la velocità di cut-in, che rappresenta il limite inferiore, e la velocità di cut-out, che rappresenta il limite superiore. La velocità del vento alla quale la potenza prodotta è pari alla potenza nominale della turbina è detta velocità nominale.

Nell'intervallo di velocità del vento tra la velocità di cut-in e la velocità nominale, la potenza prodotta è crescente in maniera proporzionale al cubo della velocità del vento.

Ogni turbina eolica ha una propria curva di potenza in funzione della velocità del vento, la quale viene fornita dal costruttore. Sono riportate delle relazioni che approssimano l'andamento di tale curva come quelle di seguito: [30]

$$P_{1,WT} = \begin{cases} 0 & V \leq V_{cut-in}, V \geq V_{cut-out} \\ V^3 \cdot a - P_{1,wt,inst} \cdot b & V_{cut-in} < V < V_{nom} \\ P_{1,wt,inst} & V_{nom} \leq V < V_{cut-out} \end{cases}$$

$$a = \frac{P_{1,wt,inst}}{V_{nom}^3 - V_{cut-in}^3}$$

$$b = \frac{V_{cut-in}^3}{V_{nom}^3 - V_{cut-in}^3}$$

Il termine $P_{1,WT}$ indica la potenza elettrica prodotta da una singola turbina dato un valore generico della velocità del vento, mentre $P_{1,WT,inst}$ è la potenza elettrica nominale della turbina.

Per calcolare la potenza generata dall'impianto eolico è necessario conoscere i valori di velocità del vento, i quali vengono misurati con riferimento all'altezza Z_0 che solitamente è pari a 10 m. Tuttavia, ai fini del calcolo della potenza, la velocità del vento deve essere riferita all'altezza del mozzo della turbina eolica (Z). Poiché il vento è soggetto all'attrito del terreno, la sua velocità aumenta con l'aumentare dell'altezza da terra, in quanto l'attrito esercitato diminuisce.

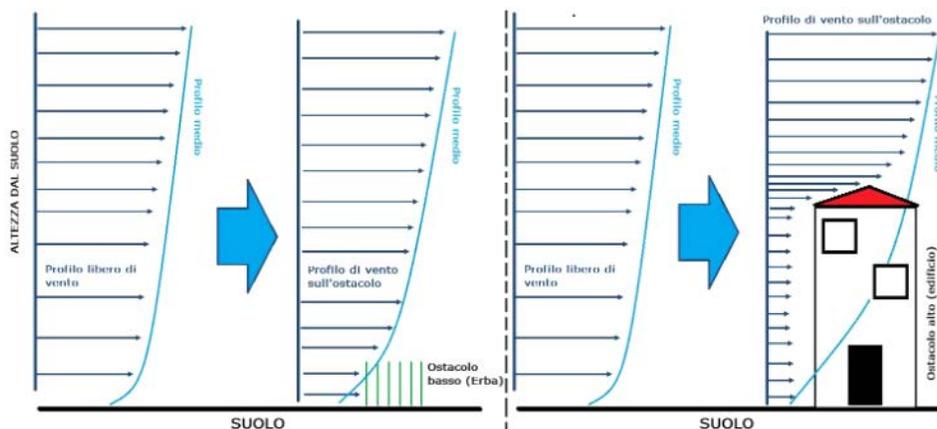


Figura 33 Andamento del vento al variare dell'altezza quando incontra un piccolo ostacolo (a sinistra) e uno grande (a destra) [31]

Per poter calcolare la velocità del vento all'altezza desiderata si applica la seguente relazione:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\Phi$$

in cui V_0 è la velocità del vento in [m/s] all'altezza di riferimento Z_0 [m], V è la velocità del vento all'altezza Z e Φ è il fattore di attrito del terreno, che solitamente viene assunto pari a 1/7.

Infine, per calcolare la potenza generata da tutto il campo eolico, si deve considerare il numero di turbine eoliche N_{WT} e il rendimento del campo eolico $\eta_{\text{campo_eolico}}$ che tiene conto dell'interferenza tra le turbine eoliche e che viene solitamente assunto pari a 0.9.

La potenza elettrica prodotta dall'impianto eolico è quindi:

$$P_{WT} = P_{1,WT} \cdot N_{WT} \cdot \eta_{\text{campo_eolico}}$$

L'output di questo sistema di equazioni è la potenza elettrica generata dall'impianto eolico P_{WT} .

Il rendimento del campo eolico è una variabile indipendente del sistema eolico e viene quindi fissato.

La velocità del vento, invece, dipende dalla ventosità della zona considerata: è perciò una variabile climatica.

2.3.4 Batteria

Il sistema di batterie si scarica per cedere l'energia al desalinizzatore quando gli impianti di generazione a fonte rinnovabile non producono abbastanza potenza e si carica assorbendo la potenza in eccesso prodotta dall'impianto eolico e fotovoltaico.

Le equazioni che descrivono la carica e la scarica della batteria sono le seguenti: [30]

$$E_{batt} = E_{batt}(t-1) + \int_{t-1}^t P \cdot dt \cdot \eta_{\text{carica}}$$

$$E_{batt} = E_{batt}(t-1) - \int_{t-1}^t P \cdot dt \cdot \frac{1}{\eta_{\text{scarica}}}$$

Generalmente si considera un rendimento di carica 80-95% e uno di scarica del 100%.

I vincoli a cui è soggetta la batteria riguardano la capacità minima della batteria, ovvero il valore minimo di energia accumulata al di sotto del quale non è possibile scendere, e la capacità massima, cioè l'energia massima che può essere contenuta nella batteria quando essa è completamente carica.

$$E_{batt,min} \leq E_{batt}(t) \leq E_{batt,max}$$

$$E_{batt,min} = (1 - DOD) \cdot E_{batt,max}$$

$$E_{batt,max} = N_{batt} \cdot E_{batt,nom}$$

Il termine DOD è la profondità di scarica, solitamente pari all'80%, ed indica il grado di scarica massima possibile della batteria. Non è possibile scaricare la batteria al di sotto di tale valore, infatti, se questo accadesse la batteria potrebbe danneggiarsi, perciò la profondità di scarica determina l'energia minima accumulabile. La capacità nominale di una singola batteria è indicata dal termine $E_{batt,nom}$ e moltiplicando tale valore per il numero di batterie N_{batt} si ottiene la capacità massima di tutto il sistema di batterie. L'energia contenuta nella batteria rappresenta l'output di questo componente.

2.3.5 Impianto di desalinizzazione

La tecnologia adottata per la desalinizzazione è l'osmosi inversa, tutti i processi di pre o post trattamento dell'acqua vengono trascurati non essendo oggetto di questa tesi.

La configurazione impiantistica adottata è quella in cui più pressioni vessel sono installati in parallelo e all'interno di ognuno di essi sono presenti più membrane connesse in serie. In questo modo la portata elaborata dalla pompa ad alta pressione viene suddivisa e distribuita in modo uguale tra i vessel in parallelo e all'interno di ognuno di essi l'acqua di alimentazione fluisce attraverso le membrane poste in serie. Poiché tutti i vessel lavorano in maniera uguale, vengono riportate le equazioni presenti in [32], che descrivono il funzionamento di uno solo di essi.

$$Q_{p,i} = A_{perm} \cdot S_e \cdot n_e \cdot TCF \cdot FF \cdot \left[\left(P_f - \frac{\Delta P_{fc}}{2} - P_p \right) - \left(CPF \frac{\pi_f + \pi_c}{2} - \pi_p \right) \right]$$

$Q_{p,i}$ [m³/h] è il flusso di permeato prodotto in un vessel, A_{perm} [m³/(m² h bar)] è la permeabilità della membrana all'acqua, S_e [m²] è l'area della singola membrana, n_e è il numero di membrane in serie contenute all'interno dello stesso vessel, TCF è il fattore di temperatura che corregge il valore delle permeabilità della membrana. Infatti, all'aumentare della temperatura dell'acqua aumenta la permeabilità e poiché essa viene assunta costante, il termine TCF permette di tenere in considerazione l'aumento del flusso $Q_{p,i}$ quando la temperatura aumenta. Tale fattore viene calcolato in funzione della temperatura dell'acqua con le relazioni:

$$TCF = \begin{cases} \exp \left[2640 \left(\frac{1}{198} - \frac{1}{273 + T_w} \right) \right], & T_w \geq 25^\circ C \\ \exp \left[3020 \left(\frac{1}{198} - \frac{1}{273 + T_w} \right) \right], & T_w < 25^\circ C \end{cases}$$

Il termine FF è il fattore di sporcamento, che è unitario se la membrana è nuova e diminuisce all'aumentare del tempo di utilizzo. P_f [bar] è la pressione dell'acqua di alimentazione, ΔP_{fc} [bar] è la perdita di carico lungo la membrana, tra il lato di alimentazione e quello del concentrato. Tale perdita viene stimata con la relazione:

$$\Delta P_{fc} = 0.756 \left(\frac{Q_{c,i} + Q_{f,i}}{2} \right)^{1.7}$$

$Q_{c,i}$ e $Q_{f,i}$ [m³/h] sono rispettivamente il flusso di concentrato e di acqua di alimentazione del vessel i-esimo.

Il termine P_p è la pressione dell'acqua desalinizzata, la quale viene solitamente considerata pari a 1 bar. CPF è il fattore di polarizzazione, che tiene conto del fenomeno di polarizzazione della membrana. Esso viene calcolato con la seguente relazione:

$$CPF = e^{0.7 \cdot Y}$$

in cui Y è il "recovery ratio", cioè il rapporto tra il flusso di permeato e quello dell'acqua di alimentazione:

$$Y = Q_{p,i} / Q_{f,i}$$

Il termine π [bar] indica la pressione osmotica di una soluzione, la quale dipende dalla concentrazione C [mg/L] della soluzione stessa e dalla sua temperatura T [°C]. La pressione osmotica viene calcolata per l'acqua di alimentazione, per il concentrato e per il permeato, e per le tre soluzioni viene calcolata mediante la seguente equazione:

$$\pi = \begin{cases} \frac{C(T + 320)}{491000}, & C < 20000 \text{ mg/L} \\ \frac{0.01117 \cdot C - 34}{14.23} \cdot \frac{(T + 320)}{345}, & C \geq 20000 \text{ mg/L} \end{cases}$$

La concentrazione C_p [mg/L] dell'acqua desalinizzata viene calcolata con la relazione:

$$C_p = B_{salt} \cdot S_e \cdot n_e \cdot TCF \left[CPF \left(\frac{C_{fc}}{Q_{p,i}} \right) \right]$$

dove B_{salt} [m³/(m² h)] è la permeabilità della membrana al sale, C_{fc} è la concentrazione media dell'acqua dal lato del concentrato e si calcola con l'equazione:

$$C_{fc} = C_{f,i} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - Y} \right) / Y$$

Le equazioni precedenti, unitamente ai bilanci di massa dell'acqua e del sale, permettono di calcolare la portata di acqua prodotta in ciascun vessel. Poiché l'acqua è considerata un liquido incomprimibile, i bilanci vengono scritti in termini di portata volumetrica:

$$Q_{f,i} = Q_{p,i} + Q_{c,i}$$

$$Q_{f,i} \cdot C_f = Q_{p,i} \cdot C_p + Q_{c,i} \cdot C_c$$

Infine, la potenza necessaria per produrre la portata totale di acqua desalinizzata Q_p è data dall'equazione:

$$Potenza = \frac{Q_f \cdot P_f}{\eta_{HPP}} - Q_c \cdot P_c \cdot \eta_{ERD}$$

$$Q_f = n_v \cdot Q_{f,i}$$

$$Q_c = n_v \cdot Q_{c,i}$$

in cui Q_f e Q_c sono rispettivamente la portata totale di alimentazione e la portata totale di concentrato, n_v è il numero di vessel in parallelo, η_{HPP} e η_{ERD} sono rispettivamente il rendimento della pompa ad alta pressione e del sistema di recupero dell'energia.

Nota la potenza assorbita dalla pompa, il consumo specifico, ovvero l'energia necessaria per produrre 1 m³ di acqua desalinizzata, è dato dalla relazione:

$$consumo = \frac{Potenza}{Q_p}$$

Un impianto di desalinizzazione dotato di un sistema per il recupero dell'energia generalmente presenta un consumo medio di circa 3 kWh/m³. L'impianto di desalinizzazione viene fatto lavorare a carico variabile visto che la potenza che gli viene fornita proviene da fonti rinnovabili e quindi non è costante. Per minimizzare il consumo di energia dell'impianto è stato scelto di mantenere costante il recovery ratio (Y) e variare la pressione e la portata di alimentazione, come nell'articolo [33]. I vincoli che caratterizzano l'impianto di desalinizzazione sono la sua potenza nominale P_{DI} , che rappresenta il valore massimo di potenza assorbita per la produzione di acqua desalinizzata, e la potenza minima P_{MD} , che rappresenta il valore minimo di potenza che deve essere fornita all'impianto affinché questo funzioni. I valori in uscita dal modello sono la portata di permeato prodotta e il consumo specifico.

2.3.6 Serbatoio di accumulo

Dopo il dissalatore è collocato il serbatoio di accumulo di volume V_{ic} [m³]. Questo riceve la portata d'acqua desalinizzata Q_p [m³/h], la quale viene stoccata al suo interno, e contemporaneamente viene prelevata l'acqua richiesta dagli utenti Q_{dem} [m³/h]. In questo modo non è necessario che la portata di acqua prodotta sia uguale istante per istante alla portata d'acqua richiesta, è quindi possibile disaccoppiare la produzione dalla domanda.

Il volume di acqua all'interno del serbatoio ad un generico istante di tempo t è perciò:

$$V_{tank}(t) = V_{tank}(t-1) + \int_{t-1}^t (Q_p - Q_{dem}) \cdot dt$$

Il volume di acqua contenuto nel serbatoio non può eccedere quello totale V_{tc} e non può essere negativo, cioè:

$$0 \leq V_{tank} \leq V_{tc}$$

La variabile V_{tank} costituisce l'output di tale sistema, mentre le altre variabili sono tutti input.

2.4 Funzionamento impianto

Per il corretto funzionamento di tutto l'impianto è necessario impostare una certa strategia operativa dei vari componenti del sistema, analoga a quella riportata in [29], rappresentata dal diagramma di flusso di Figura 34 e 35. Nella prima parte viene spiegata la gestione della potenza elettrica prodotta dalle fonti rinnovabili, nella seconda parte invece viene esposta la modalità di utilizzo della batteria. È da precisare che nella strategia operativa è incluso il modello dell'inverter, il quale prevede che la conversione della corrente continua in corrente alternata avvenga con un certo rendimento η_{inv} , perciò la potenza in uscita da esso è pari alla potenza in ingresso moltiplicata per il rendimento. La potenza prodotta dalle fonti rinnovabili (P_{RES}), viene prima di tutto utilizzata per alimentare l'impianto di desalinizzazione e successivamente, come vedremo nel Capitolo IV, viene utilizzata per la copertura totale o parziale del carico elettrico. Quando, dopo aver alimentato l'impianto di desalinizzazione ed aver coperto il carico elettrico, è disponibile ancora della potenza elettrica generata dagli impianti a risorse rinnovabili (P_{ECESSO}), essa viene utilizzata per caricare la batteria parzialmente oppure totalmente. Se dopo aver caricato la batteria fosse ancora presente della potenza, essa viene rigettata all'esterno (P_{REJ}). Per la fornitura di acqua desalinizzata non è necessaria la contemporaneità tra produzione e richiesta, in quanto dopo l'impianto di desalinizzazione è presente un serbatoio di accumulo in cui viene stoccata l'acqua prodotta dall'impianto. L'acqua contenuta all'interno del serbatoio viene perciò utilizzata per soddisfare il fabbisogno idrico, in tempi che possono essere diversi rispetto alla sua produzione. Il dissalatore produce acqua allo scopo di sostituire l'acqua che viene sottratta al serbatoio, perché consumata, e per cercare di mantenere il livello del serbatoio al di sopra del 90%. Quando il livello del serbatoio scende sotto il 90% e la potenza resa disponibile dagli impianti eolico e fotovoltaico non è sufficiente a ripristinare tale livello, viene utilizzata anche l'energia contenuta nella batteria. Solo dopo che la batteria ha eventualmente fornito all'impianto di desalinizzazione la potenza richiesta, la batteria fornisce la potenza necessaria per soddisfare la quota mancante del carico elettrico. Quando però l'energia contenuta nella batteria non è in grado di coprire la totalità di questa quota di carico elettrico, la parte del carico non coperta viene soddisfatta da un generatore diesel che lavorerà a carico variabile (Capitolo IV). [10]

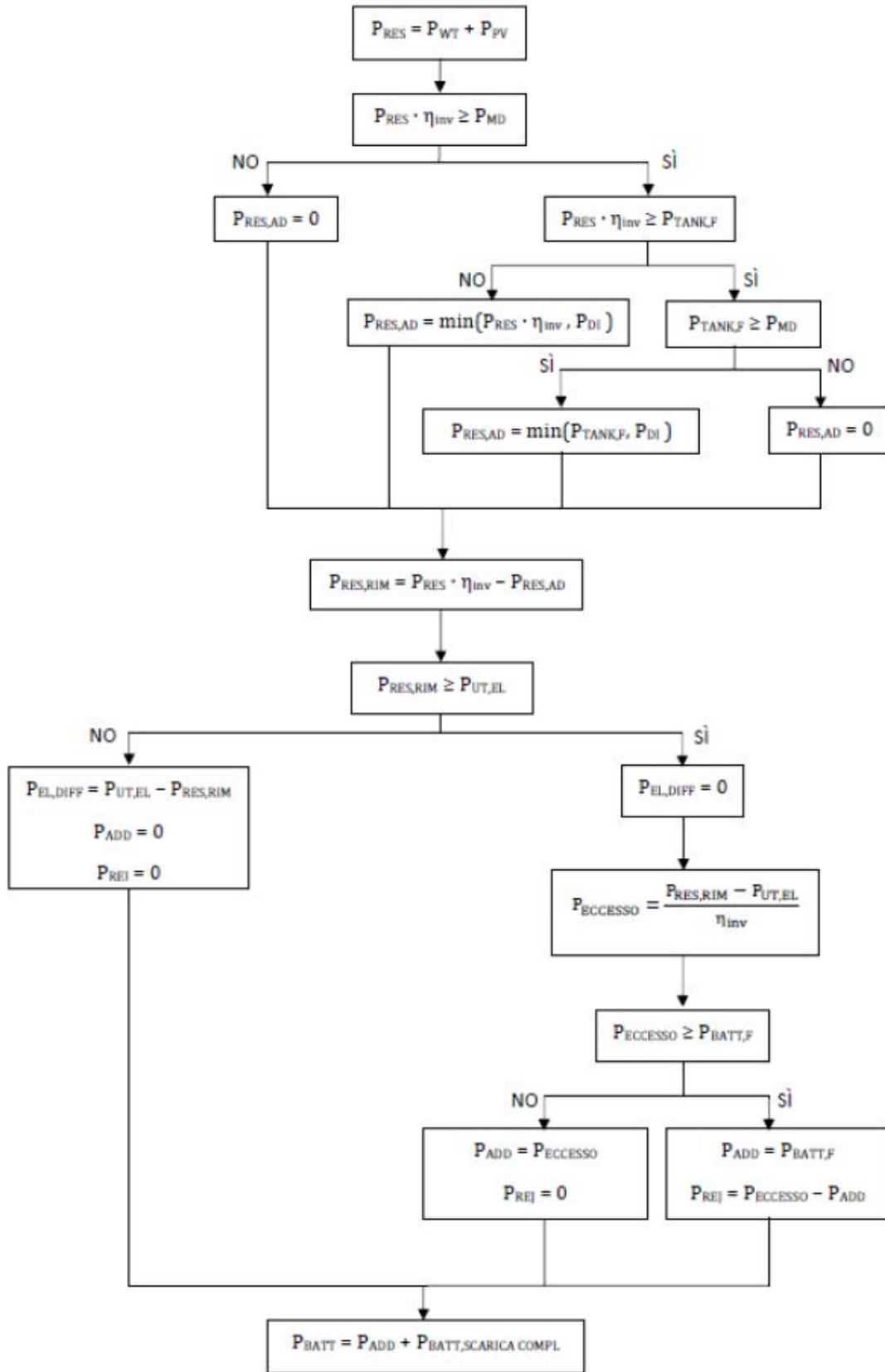


Figura 34 Diagramma di flusso della gestione della potenza prodotta dagli impianti a fonte rinnovabile

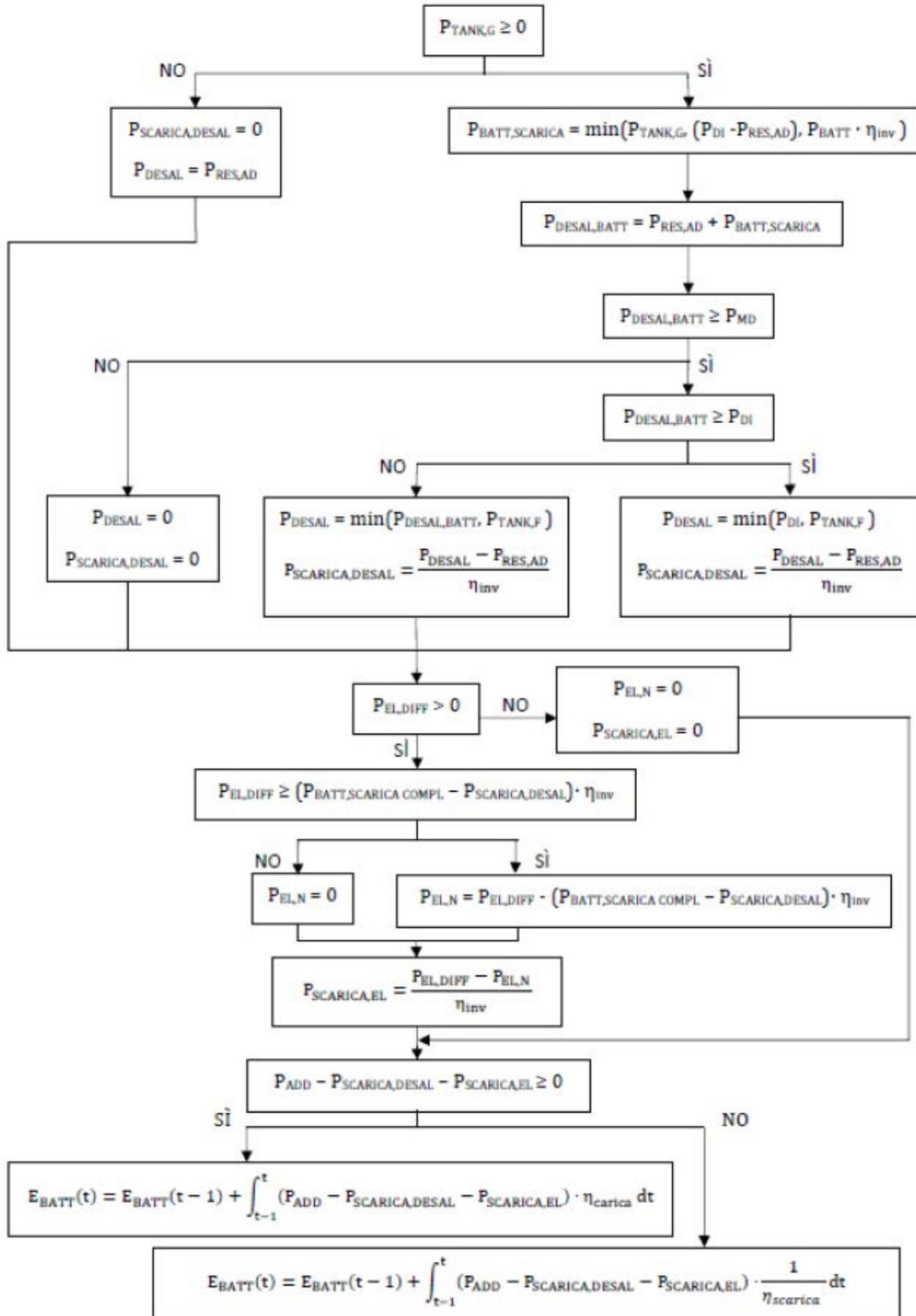


Figura 35 Diagramma di flusso della gestione della batteria

Le variabili presenti nel diagramma di flusso che non sono state spiegate nei paragrafi precedenti sono le seguenti:

- $P_{batt,scarica_compl}$: indica la potenza di scarica completa della batteria, ovvero la potenza necessaria per portare la batteria dal livello di energia che possiede fino al livello minimo nell'intervallo di tempo considerato.
- $P_{batt,f}$: è la potenza per caricare completamente la batteria nell'intervallo di tempo considerato..
- $P_{tank,f}$: è la potenza necessaria per produrre nell'intervallo di tempo considerato la portata di acqua necessaria a riempire completamente il serbatoio.
- $P_{tank,g}$: è la potenza necessaria per produrre nell'intervallo di tempo considerato la portata di acqua necessaria a riempire il serbatoio fino a raggiungere un livello pari al 90% del suo volume totale.

2.5 Indici tecnici

Di seguito vengono riportati gli indici tecnici, descritti negli articoli [29] e [10], i quali sono stati utilizzati per la valutazione dei risultati ottenuti dalla simulazione del funzionamento dell'impianto nel periodo di un anno.

- **Tasso di copertura della domanda di acqua desalinizzata**, è dato dal rapporto tra il volume di acqua desalinizzata che in un anno viene inviato alle utenze (Q_N) e il volume totale di acqua che in un anno viene richiesto dagli utenti (Q_{dem}) :

$$F_{DS} = 1 - \frac{V_{N_anno}}{V_{dem_anno}} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{8760} Q_N}{\sum_{j=1}^{8760} Q_{dem}}$$

- **Frazione dell'energia rigettata**, che è espresso dal rapporto tra la totale energia che in un anno viene prodotta gli impianti eolico e fotovoltaico (P_{REJ}), che non potendo essere sfruttata viene rigettata verso l'ambiente, e la totale energia prodotta (P_{RES}):

$$F_{REJ} = \frac{E_{rej_anno}}{E_{res_anno}} = \frac{\sum_{j=1}^{8760} P_{REJ}}{\sum_{j=1}^{8760} P_{RES}}$$

- **Tasso di contribuzione della batteria all'impianto di desalinizzazione**, che indica il contributo della batteria per la fornitura di energia all'impianto di desalinizzazione ed è espresso dal rapporto tra la totale energia che il dissalatore riceve dalla batteria e la totale energia assorbita in un anno:

$$\begin{aligned} F_{BATT} &= \frac{E_{batt_desal_anno}}{E_{desal_anno}} = \frac{\sum_{j=1}^{8760} P_{scarica_desal} \cdot \eta_{inv}}{\sum_{j=1}^{8760} P_{desal}} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^{8760} (P_{scarica} - P_{scarica_el}) \cdot \eta_{inv}}{\sum_{j=1}^{8760} P_{desal}} \end{aligned}$$

- *Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico:*

$$CF_{PV} = \frac{\sum_{j=1}^{8760} \left(\frac{P_{PV}}{P_{RES}} \right) \cdot (P_{RES} - P_{REJ})}{P_{PV,inst} \cdot 8760}$$

- *Fattore di capacità dell'impianto eolico:*

$$CF_{WT} = \frac{\sum_{j=1}^{8760} \left(\frac{P_{WT}}{P_{RES}} \right) \cdot (P_{RES} - P_{REJ})}{P_{WT,inst} \cdot 8760}$$

2.6 Indici economici

In questo paragrafo vengono riportate le relazioni per il calcolo del costo di produzione dell'acqua desalinizzata. Per calcolare questo costo è necessario innanzitutto determinare per ciascun componente d'impianto il costo d'investimento ed i costi operativi e di manutenzione. Essi vengono calcolati in funzione della taglia del componente considerato, utilizzando delle relazioni presenti in letteratura, che vengono riportate di seguito. Tutte le potenze sono espresse in [kW], il volume del serbatoio in [m³], i costi d'investimento in [€], i costi operativi e di manutenzione in [€/anno].

- *Impianto eolico*

Le equazioni relative ai costi di tale impianto sono state ricavate dall'articolo [29], e sono le seguenti:

$$IC_{WT} = 1300 \cdot P_{WT,inst}$$

$$OM_{WT} = 0.02 \cdot IC_{WT}$$

- *Impianto fotovoltaico*

Le equazioni relative ai costi di tale impianto sono state ricavate dall'articolo [30], e sono le seguenti:

$$IC_{PV} = 1400 \cdot P_{PV,inst}$$

$$OM_{PV} = 0.02 \cdot IC_{PV}$$

- *Inverter*

Le equazioni relative ai costi di tale impianto sono state ricavate dall'articolo [34], e sono le seguenti:

$$IC_{inv} = 350 \cdot P_{inv,nom}$$

$$OM_{inv} = 20$$

- **Impianto di desalinizzazione e serbatoio di accumulo**

Le equazioni relative ai costi di tale impianto sono state ricavate dall'articolo [29], e sono le seguenti:

$$IC_{RO} = 2270 \cdot D_{FC}^{0.875}$$

$$IC_{TANK} = 1090.8 \cdot V_{TC}^{0.61}$$

$$IC_{DES} = IC_{TANK} + IC_{RO}$$

$$OM_{DES} = 0.6 \cdot W_{AP}$$

$$W_{AP} = \sum_{j=1}^{8760} Q_{p,j}$$

$$D_{FC} = 24 \left(\frac{P_{di}}{\text{consumo}} \right)$$

Dove D_{FC} [m³/giorno] è la capacità di produzione giornaliera di acqua e W_{AP} [m³/anno] è la quantità totale di acqua prodotta in un anno.

- **Batteria**

$$IC_{batt} = 340 \cdot E_{batt,nom} \cdot N_{batt}$$

- **Costo di produzione dell'acqua**

I costi relativi all'impianto di desalinizzazione vengono attribuiti solamente all'acqua desalinizzata. Il costo di produzione dell'acqua, espresso in [€/m³], è quindi dato dalla relazione:

$$W_{cost} = \frac{(IC_{wt} + IC_{pv} + IC_{inv} + IC_{bat} + IC_{des})f_a + OM_{wt} + OM_{pv} + OM_{inv} + OM_{des}}{W_{AP}}$$

$$f_a = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}}$$

f_a è il fattore che tiene conto del deprezzamento annuale del costo d'investimento, r è il tasso di sconto dell'investimento ed n è il numero di anni di vita dell'impianto.

2.7 Raccolta dati

La raccolta dei valori climatici, utili per la simulazione viene effettuata ora per ora nell'arco di un anno tipo. Perciò, ci saranno 8760 valori da esaminare per ognuna delle variabili climatiche considerate. La tipologia dei dati è riferita ad una particolare zona geografica, in questa tesi si fa riferimento all'isola di Sal una delle dieci isole facenti parte dell'arcipelago di Capo Verde. Tale simulazione, può essere utilizzata anche in altri luoghi considerando variabili del clima differenti. I dati climatici necessari per il progetto sono:

- La temperatura dell'aria (Figura 36)

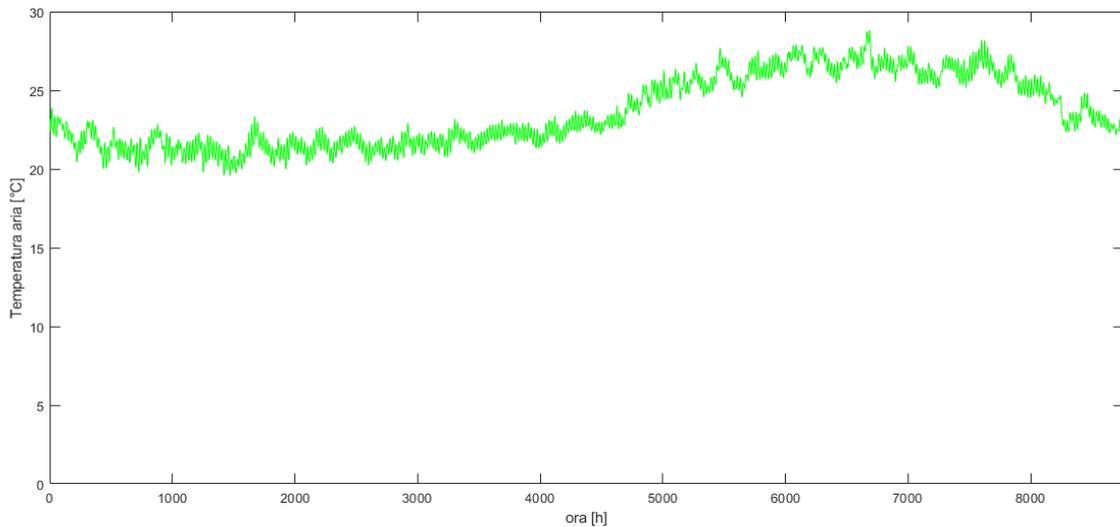


Figura 36 Temperatura dell'aria annua

- La temperatura dell'acqua (Figura 37)

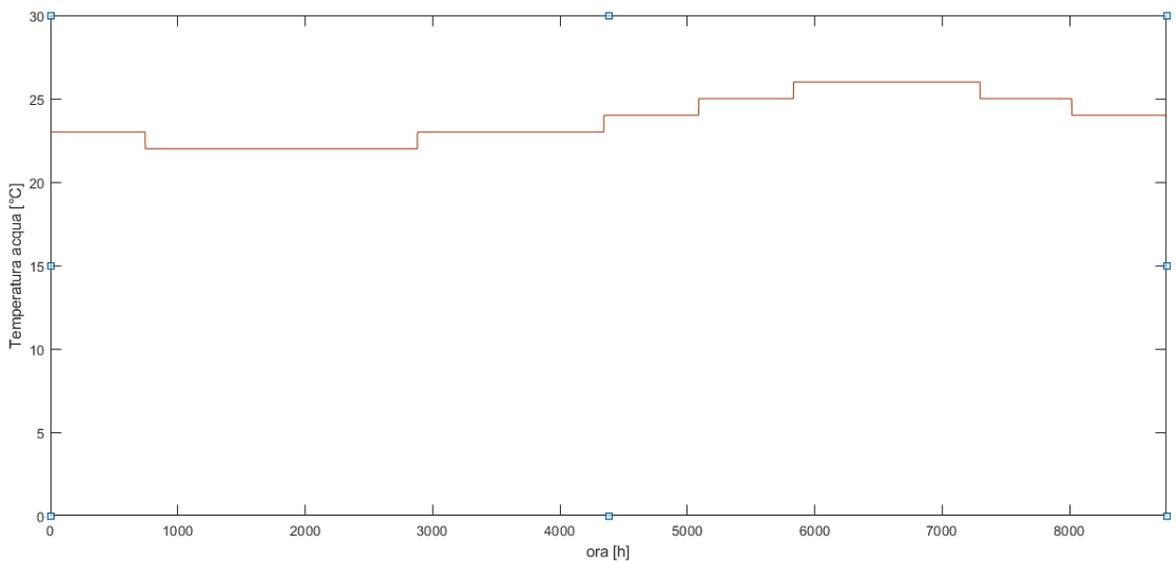


Figura 37 Temperatura dell'acqua annua

- L'irradianza globale (Figura 38)

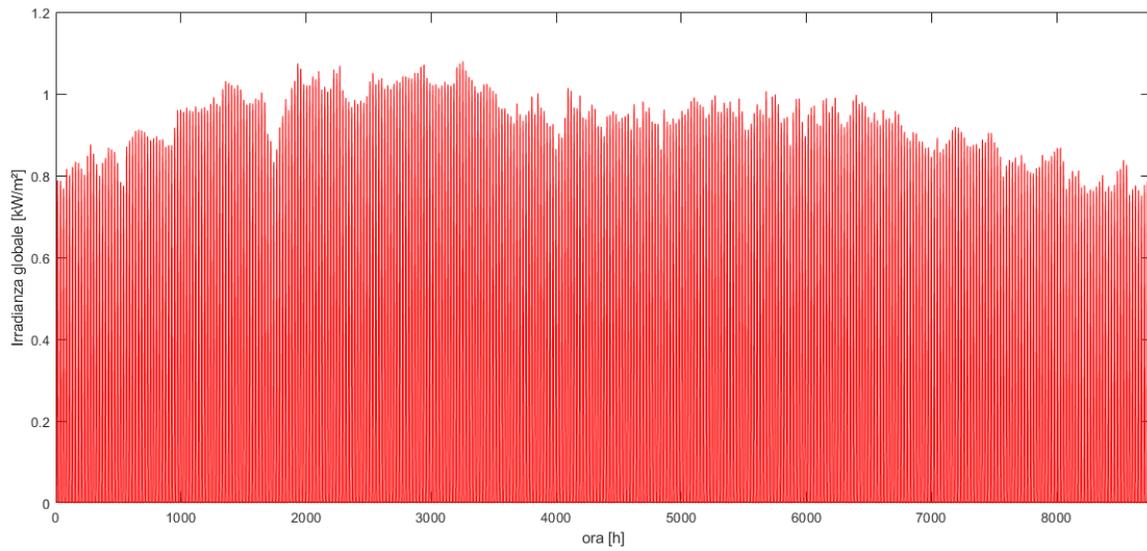


Figura 38 Irradianza globale annua

- La velocità del vento (Figura 39)

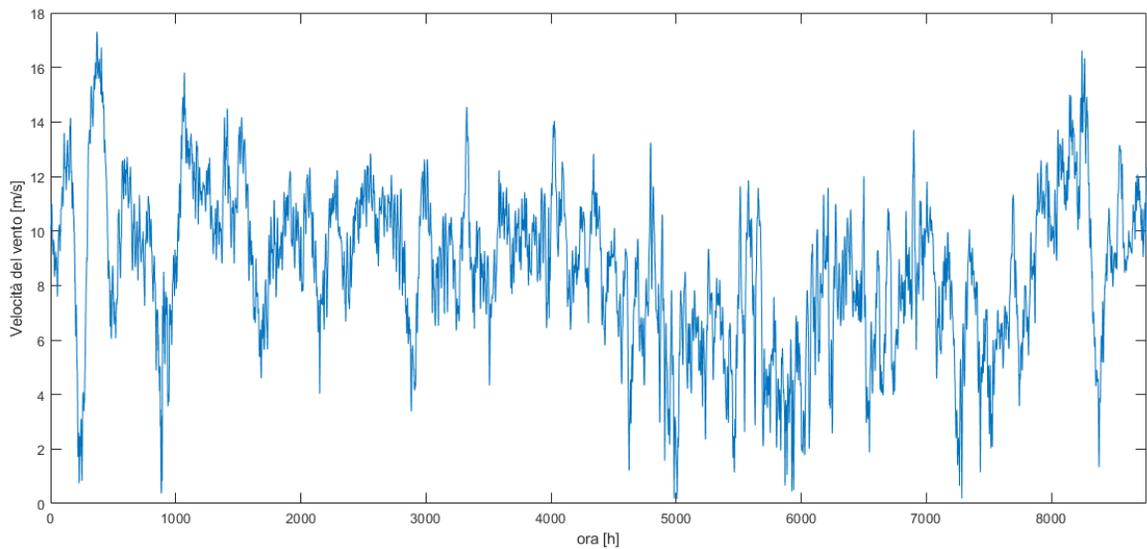


Figura 39 Velocità del vento annua

I valori sono stati raccolti al seguente sito [36].

N.B. Per la raccolta dei dati relativi alla temperatura dell'acqua, non avendo trovato variazioni orarie della temperatura del mare che bagna le coste dell'isola, ma valori mensili di essa (articolo [37]), si è ipotizzato che la temperatura dell'acqua rimanga costante per tutto il mese considerato.

È da specificare che le equazioni dell'impianto ad osmosi inversa, così come sono state presentate nel paragrafo 2.3, non possono essere implementate in Simulink, in quanto si creerebbe un loop algebrico. Questo è dovuto al fatto che in tali equazioni la potenza elettrica è espressa in funzione della portata d'acqua di alimentazione, quando invece si vuole determinare la portata di permeato e la portata d'acqua di alimentazione in funzione della potenza assorbita. Per poter risolvere tale problema all'interno del subsystem relativo all'impianto di desalinizzazione è stato realizzato un ciclo iterativo che agisce nel seguente modo:

- Si inizializza il valore di portata di permeato ($Q_{P,old}$).
- Si calcola la potenza richiesta per produrre tale valore di portata mediante le equazioni riportate nel paragrafo 2.3.
- Si calcola l'errore, cioè la differenza tra la potenza calcolata e quella disponibile:

$$err = P_{disponibile} - P_{calcolata}$$

- Si utilizza l'errore calcolato per far variare la portata di permeato nella direzione di riduzione dell'errore. Il nuovo valore di portata quindi è:

$$Q_{P,new} = Q_{P,old} + k \cdot err$$

in cui k è una costante di amplificazione o riduzione dell'errore, necessaria affinché il sistema giunga a convergenza.

- Si ripete il ciclo iterativo con il nuovo valore di portata, finché l'errore calcolato è inferiore ad una certa tolleranza, che è stata posta uguale a 10^{-12} .

Una volta che il ciclo è giunto a convergenza è nota la portata d'acqua prodotta dal dissalatore in funzione della potenza in ingresso, con questi valori è possibile calcolare il consumo specifico, che deve essere mediamente di circa 3 kWh/m^3 .

Tuttavia, nell'articolo [29], preso come riferimento, per calcolare la produzione dell'impianto ad osmosi inversa si considera solamente il consumo medio di energia di tale componente, ovvero:

$$Q_P = \frac{\text{Potenza}}{\text{consumo}} = \frac{\text{Potenza}}{3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}}$$

Dunque, oltre ad aver costruito il modello dell'impianto di dissalazione come esposto precedentemente, è stato realizzato anche un altro modello Simulink in cui si considera il consumo medio di energia pari a 3 kWh/m^3 per calcolare la portata d'acqua prodotta dal dissalatore.

Una volta realizzato il diagramma a blocchi dell'impianto, sono stati configurati i parametri della simulazione. L'intervallo di simulazione è stato preso pari a 8760 h, ovvero un anno, con un passo temporale di un'ora. Infine, poiché nel modello sono presenti dei blocchi integratori, è stato scelto il solutore "ode 4".

Capitolo III

Realizzazione impianto per copertura fabbisogno idrico

3.1 Dimensionamento componenti

Il sistema in questa prima configurazione è costituito da un impianto fotovoltaico e uno eolico, una batteria, un inverter, un dissalatore e un serbatoio. L'insieme di questi componenti verrà dimensionato sulla base del numero di residenti e dalla loro rispettiva richiesta d'acqua desalinizzata.

3.1.1 Impianto di desalinizzazione

Grazie alla presenza del serbatoio, l'impianto di desalinizzazione non deve fornire la portata d'acqua richiesta istante per istante. Perciò la potenza installata di tale impianto viene scelta in modo tale che sia in grado di fornire una portata d'acqua pari al consumo orario medio annuo. Tale valore è assunto pari a 365 m³/h, considerando un consumo medio di 3 kWh/m³, la potenza installata del dissalatore è di 1.1 MW.

Daily water consumption (l/day/person)		
Population type	Winter	Summer
Resident, R_{wc}	60	75
Seasonal, S_{wc}	75	100

Tabella 2 Consumi specifici giornalieri

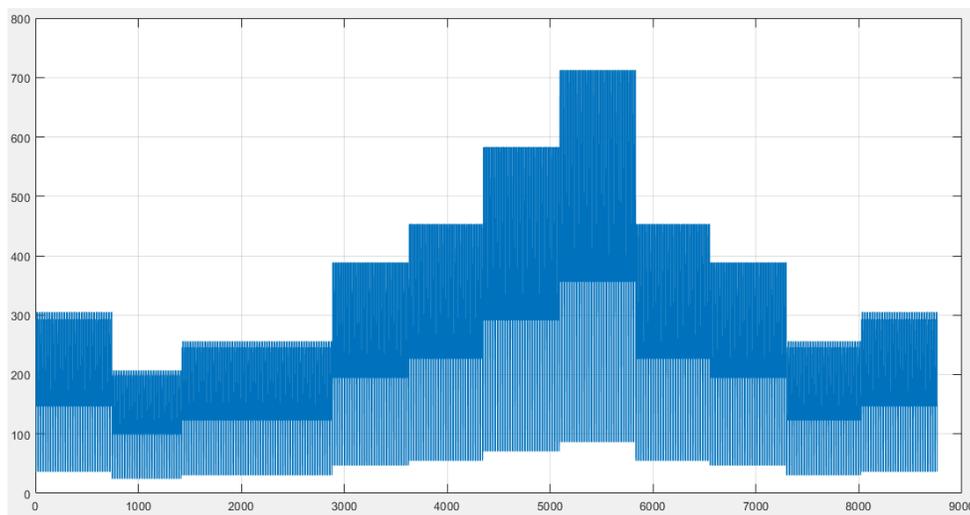


Figura 41 Andamento della domanda d'acqua

Nella Tabella 3, vengono riportati i vari parametri per l'impianto di desalinizzazione.

Dissalatore ad osmosi inversa		
Potenza nominale	P_{DI} [kW]	1100
Potenza minima	P_{MD} [kW]	275
Numero di membrane per recipiente	n_e	7
Numero di recipienti in pressione	n_v	103
Permeabilità della membrana all'acqua	A_{perm} [m ³ /(m ² h bar)]	$1.086 \cdot 10^{-5}$
Permeabilità della membrana al sale	B_{salt} [m ³ /(m ² h)]	$4.65 \cdot 10^{-7}$
Superficie della membrana	S_e [m ²]	35
Recovery ratio	Y [%]	45
Fattore di sporramento	FF [%]	90
Rendimento della pompa di alta pressione	η_{HPP} [%]	80
Rendimento del sistema di recupero	η_{ERD} [%]	90

Tabella 3 Dati dell'impianto di desalinizzazione

La potenza minima è stata fissata pari al 25% di quella nominale, come in [29], i valori di permeabilità della membrana e del rendimento della pompa vengono assunti come in [32], il numero di membrane e di recipienti in pressione vengono assunti utilizzando come riferimento il dissalatore MSW-300N riportato in [40].

3.1.2 Serbatoio di stoccaggio

Il serbatoio è stato dimensionato per essere in grado di fornire, in maniera autonoma, acqua per due giorni consecutivi nel periodo estivo alla popolazione. Attraverso la formula seguente è stato calcolato il volume del serbatoio.

$$((75 \cdot 2 \cdot R_{wc}) + (100 \cdot 2 \cdot S_{wc}))/1000 = 19250 \text{ m}^3$$

Nel mese di agosto:

$$R_{wc} = 35000, S_{wc} = 70000$$

3.1.3 Impianti di generazione a fonte rinnovabile

Per il dimensionamento degli impianti di generazione si è deciso che essi debbano avere una potenza installata totale pari al triplo della potenza installata del dissalatore, in modo da poter avere un eccesso di produzione per caricare la batteria. La potenza totale installata dei due impianti (3300 kW), è suddivisa in questo modo:

- 2550 kW per l'impianto eolico
- 750 kW per l'impianto fotovoltaico

3.1.3.1 Impianto Eolico

Il modello di turbina eolica scelto è la Vestas V52 / 850 [41]. Le caratteristiche di tale turbina vengono riportate nella tabella sottostante

Turbina eolica Vestas V52/850		
Potenza nominale	P_{nom} [kW]	850
Velocità nominale	V_{nom} [m/s]	16
Velocità di cut-in	V_{cut-in} [m/s]	4
Velocità di cut-out	$V_{cut-out}$ [m/s]	25
Altezza del mozzo	Z [m]	65

Tabella 4 Dati della turbina eolica

Per avere una potenza installata dall'eolico pari a 2550 kW, saranno necessarie tre turbine eoliche.

3.1.3.2 Impianto Fotovoltaico

Il modulo fotovoltaico in silicio monocristallino è di EXE Solar (*EXM 320/156-60*) [42] e presenta le seguenti caratteristiche:

Modulo fotovoltaico EXM 320/156-60		
Potenza nominale	P_{nom} [W]	320
Rendimento standard	η_{STC} [%]	19.70
Area del modulo	A_m [m ²]	1.625
Coefficiente di temperatura per la potenza	β_t [°C ⁻¹]	0.0042
Temperatura operativa di cella	NOCT [°C]	45

Tabella 5 Dati del modulo fotovoltaico

Per avere una potenza installata dell'impianto fotovoltaico pari a 750 kW, saranno necessari circa 2345 moduli.

3.1.4 Inverter

Per quanto riguarda l'inverter, che viene utilizzato per la conversione della corrente continua in corrente alternata, si è considerato che esso abbia un rendimento del 97%.

3.1.5 Batteria

La batteria è stata dimensionata con una capacità tale da avere un'autonomia di tre giorni consecutivi, per poter fornire al dissalatore l'energia necessaria per la produzione d'acqua. Avendo dimensionato il dissalatore con una potenza di 1100 kW, l'energia che esso consuma in tre giorni è di 79200 kWh. Considerando una profondità di scarica di circa 80%, la capacità nominale del sistema di batterie è di circa 100000 kWh. Il rendimento di carica della batteria è stato assunto pari a 0.7, mentre il rendimento di scarica è stato considerato unitario.

3.2 Risultati dei modelli

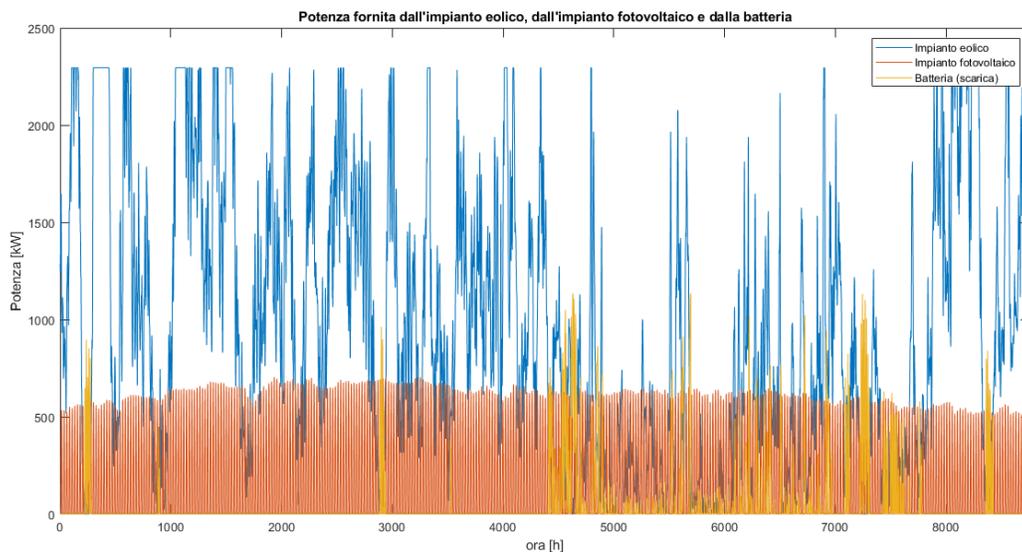
I modelli analizzati di seguito sono due, ottenuti con Simulink, in cui si assume per il dissalatore:

- un consumo costante pari a 3 kWh/m³
- un consumo specifico variabile dell'impianto di desalinizzazione, realizzato con le equazioni riportate nel paragrafo 2.3.5.

$$consumo = \frac{Potenza}{Q_p}$$

3.2.1 Risultati modello con consumo costante

Vengono riportati di seguito gli andamenti orari delle variabili caratterizzanti il funzionamento dell'impianto, considerando un consumo costante nell'arco di un anno (Figura 42).



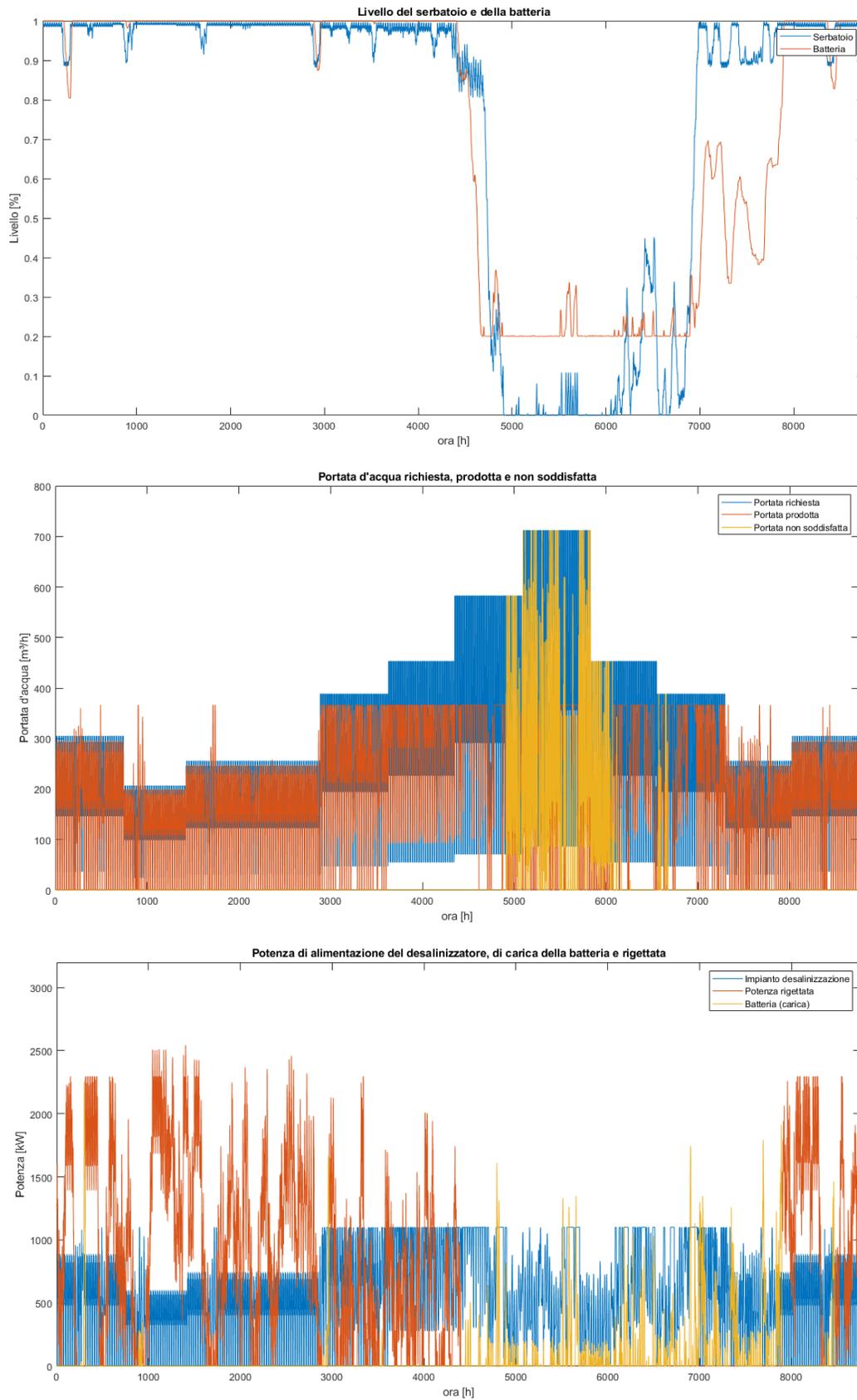


Figura 42 Andamenti orari nell'arco di un anno

Nei prossimi paragrafi si valuteranno gli andamenti orari del modello a consumo costante nel mese di febbraio ed agosto.

3.2.1.1 Risultati modello mese di febbraio

Prendendo come riferimento il mese di febbraio (744 - 1416 ore), si nota che:

- la maggior parte della potenza fornita è data dall'impianto eolico (blu), poi dall'impianto fotovoltaico (rosso) e infine dalla batteria (giallo). (Figura 43)
- la batteria fornisce solamente una piccola quantità di energia, in particolare, nel periodo di assenza della produzione dell'impianto eolico e fotovoltaico, o quando la potenza fornita dagli impianti di generazione è inferiore a 275 kW, che è il valore minimo perché entri in funzione il dissalatore. (Figura 43)

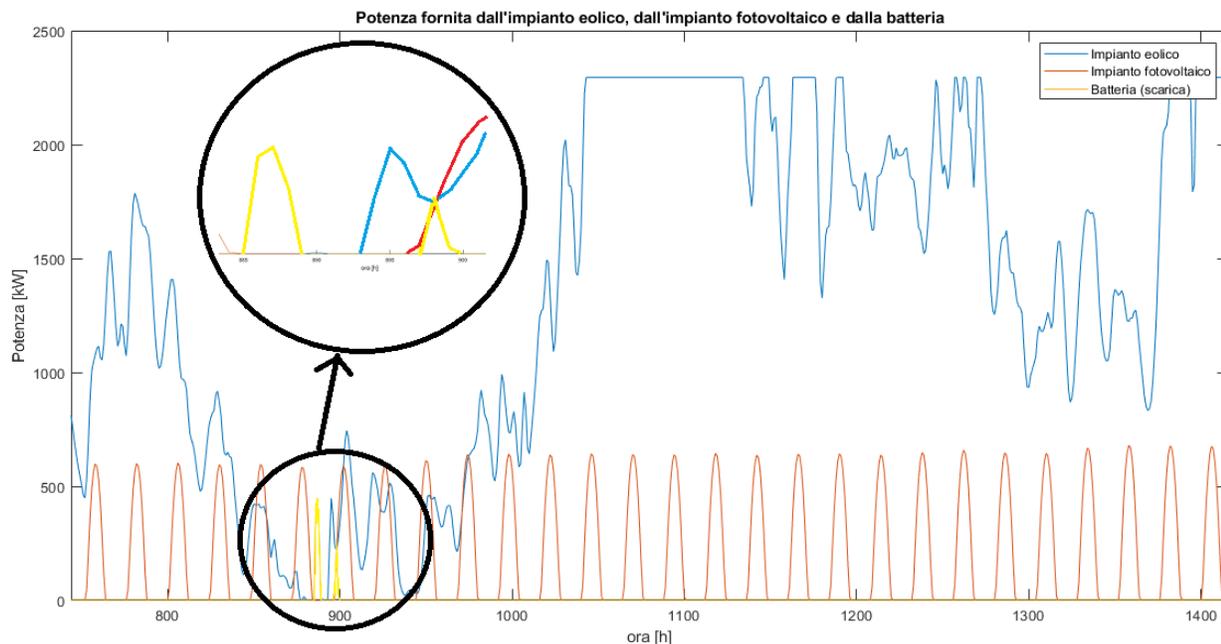


Figura 43 Potenza fornita dall'impianto eolico, fotovoltaico e dalla batteria nel mese di febbraio

- Nel periodo in cui c'è l'assenza di produzione di potenza, il livello del serbatoio inizia a calare (Figura 44), se il livello scende al di sotto del 90%, entra in funzione la batteria (*). Quando viene fornita nuovamente potenza al dissalatore da parte degli impianti di generazione, il serbatoio viene riempito completamente. Nel successivo periodo di mancanza di produzione, se il livello del serbatoio non scende sotto al 90% non entra in funzione la batteria (**).

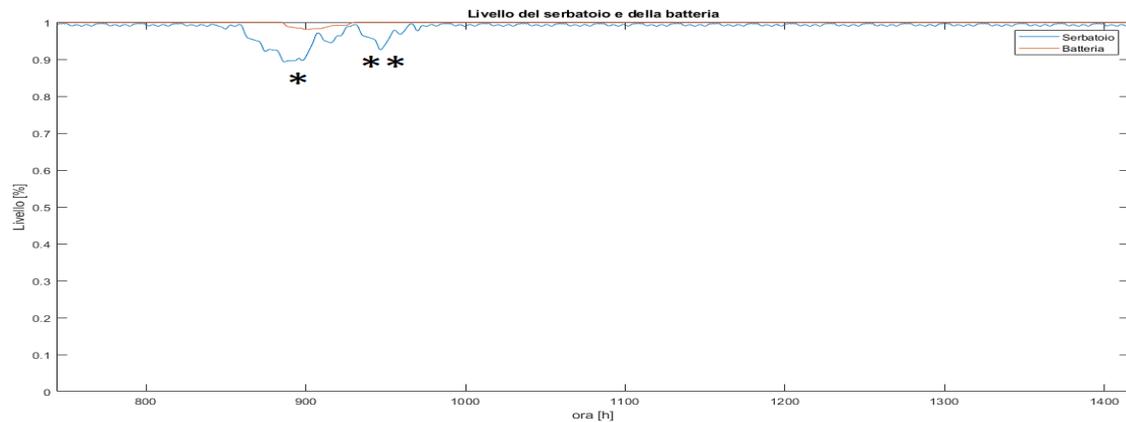


Figura 44 Livello del serbatoio e dalla batteria nel mese di febbraio

- Il dissalatore in questo mese è sempre in grado di soddisfare la richiesta d'acqua, per cui la portata non soddisfatta è nulla. (Figura 45)

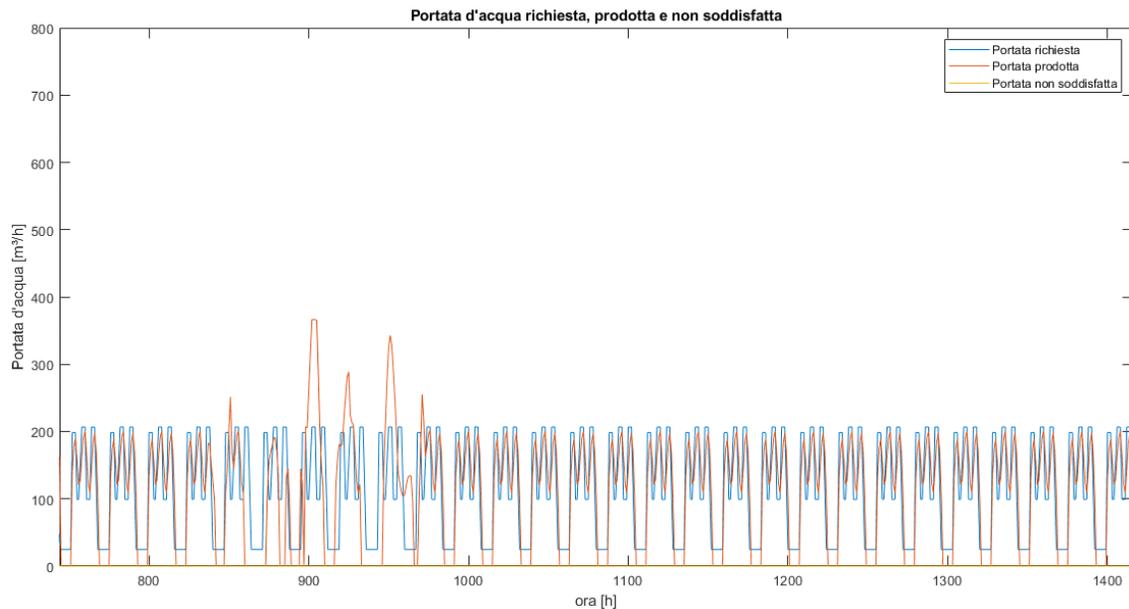


Figura 45 Portata d'acqua richiesta, prodotta e non soddisfatta nel mese di febbraio

- La Figura 46, mostra come sia molto elevata la potenza rigettata, infatti, nel periodo invernale, la potenza assorbita dall'impianto di desalinizzazione è bassa e l'eccesso di potenza prodotta non può essere accumulato nella batteria perché essa è quasi sempre completamente carica.

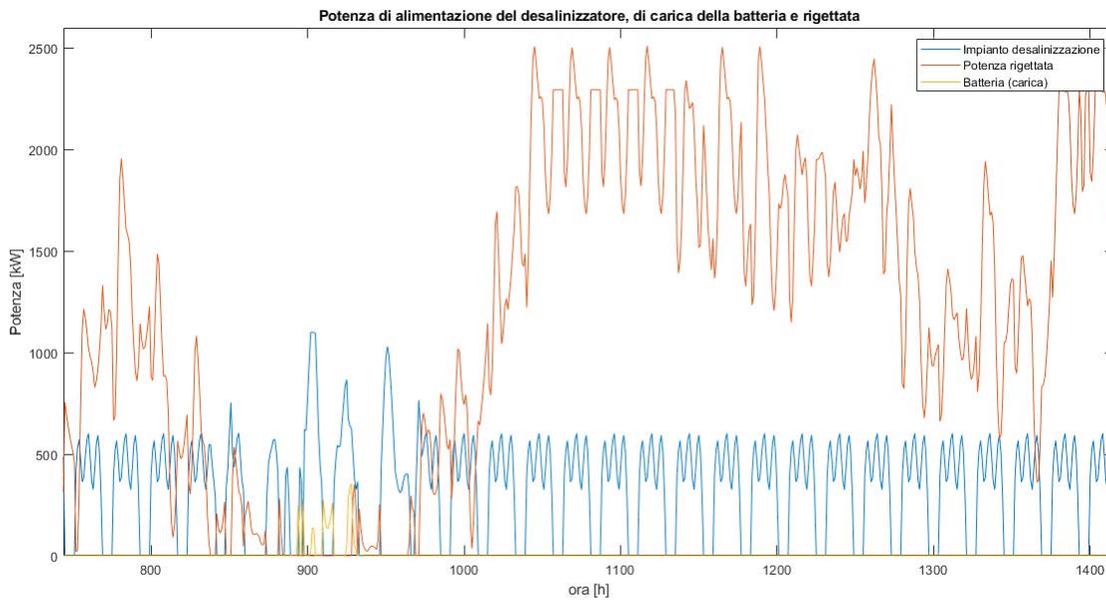


Figura 46 Potenza di alimentazione del dissalatore, di carica della batteria e rigettata nel mese di febbraio

3.2.1.2 Risultati modello mese di agosto

Prendendo come riferimento il mese di agosto (5080 - 5832 ore), si nota che:

- la batteria fornisce potenza all'impianto di desalinizzazione molto più frequentemente rispetto al caso precedente (soprattutto a causa del flusso turistico e quindi ad una maggiore richiesta d'acqua) e questo avviene quando la potenza prodotta dalle fonti rinnovabili è bassa o nulla. (Figura 47)

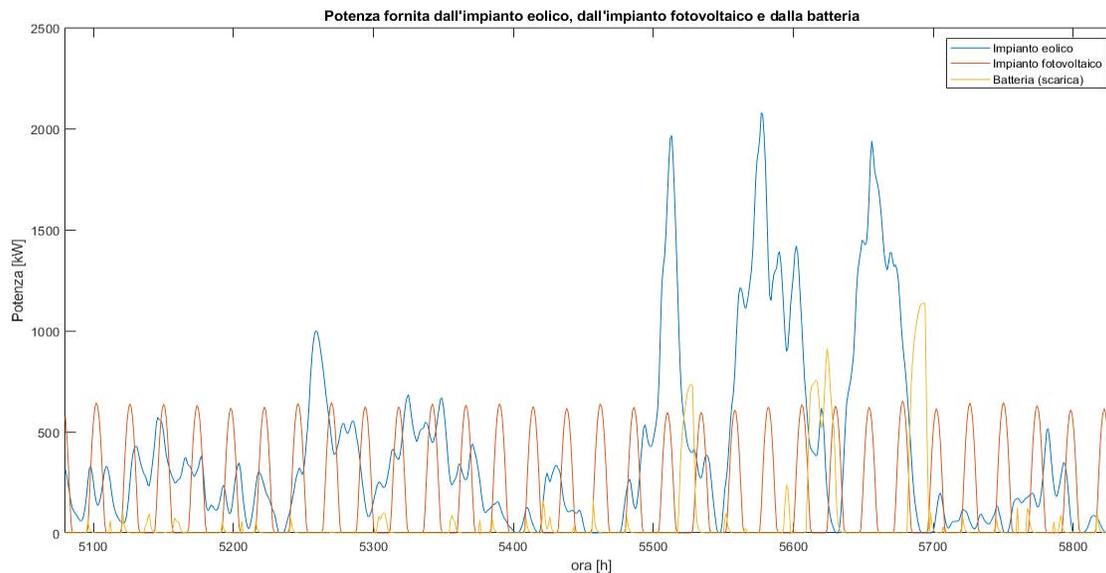


Figura 47 Potenza fornita dall'impianto eolico, fotovoltaico e dalla batteria nel mese di agosto

- In questo periodo il serbatoio di accumulo è quasi sempre completamente vuoto, in quanto, la maggiore richiesta idrica non consente ad esso di riempirsi. Il serbatoio aumenta di livello nelle ore in cui la domanda è più bassa, ma poi si scarica totalmente nelle ore di picco. Per quanto riguarda la batteria, anch'essa nella stagione estiva, è quasi sempre completamente scarica. (Figura 48)

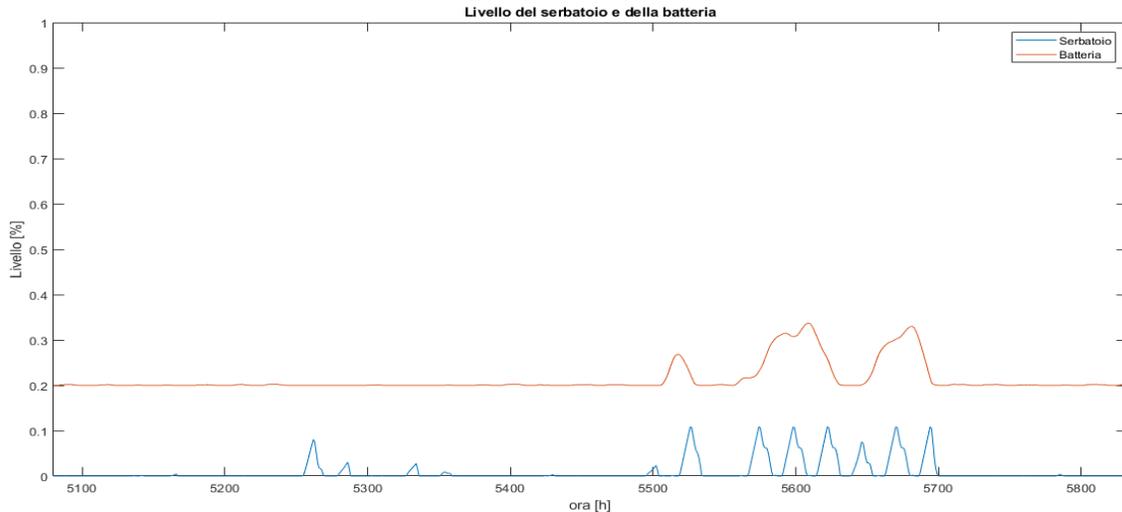


Figura 48 Livello del serbatoio e della batteria nel mese di agosto

- l'acqua stoccata nella fase di bassa richiesta non è sufficiente a coprire la punta del carico, quindi parte della domanda non può essere soddisfatta. (Figura 49)

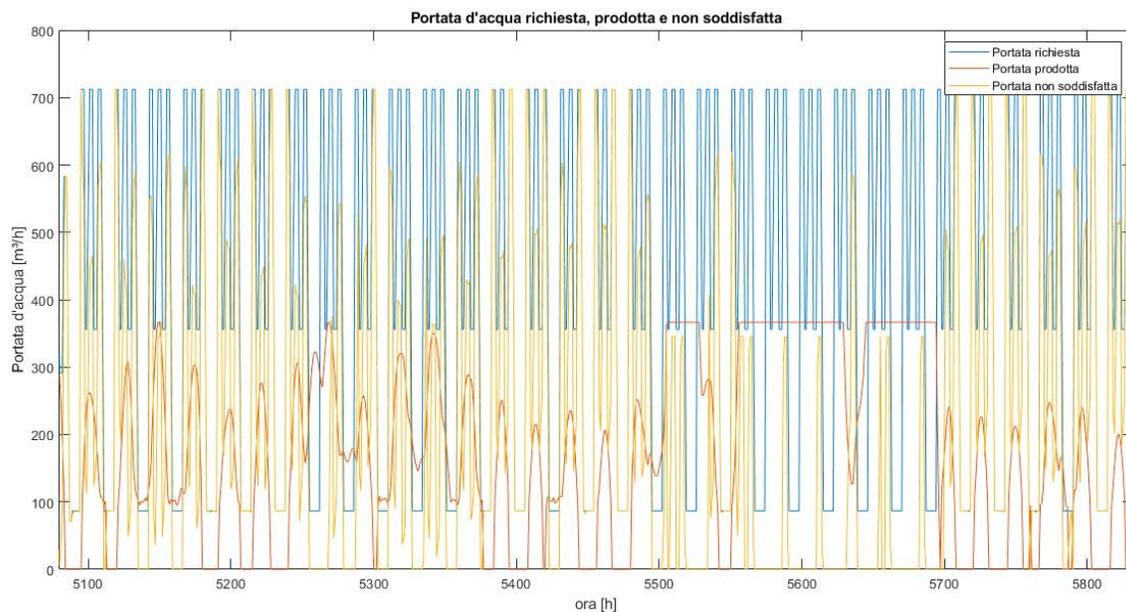


Figura 49 Portata d'acqua richiesta, prodotta e non soddisfatta nel mese di agosto

- La Figura 50 evidenzia come la potenza rigettata all'esterno sia nulla, in quanto l'eccesso di potenza viene sempre accumulato nella batteria che non è mai completamente carica.

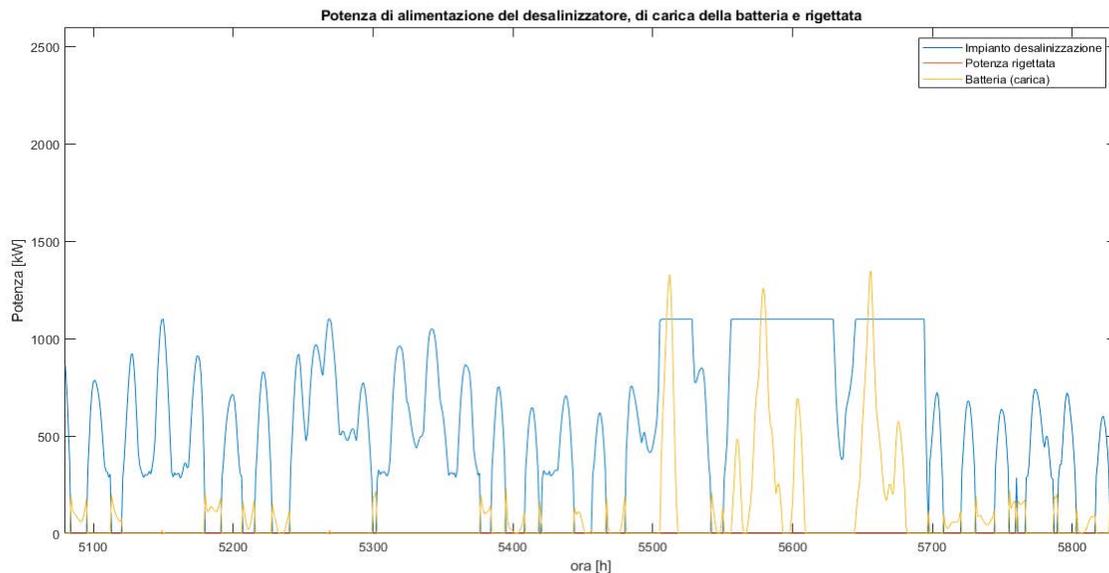


Figura 50 Potenza di alimentazione del dissalatore, di carica della batteria e rigettata nel mese di agosto

3.2.1.3 Valori degli indici tecnici ed economici

Nella Tabella 6 vengono riportati i valori degli indici tecnici ed economici, elaborati tramite Simulink.

		Simulink
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	86,53
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	48,41
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore	F_batt [%]	6,97
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	17,41
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	18,15
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	1619400
Costo di produzione dell'acqua	W_cost [€/m ³]	2,95

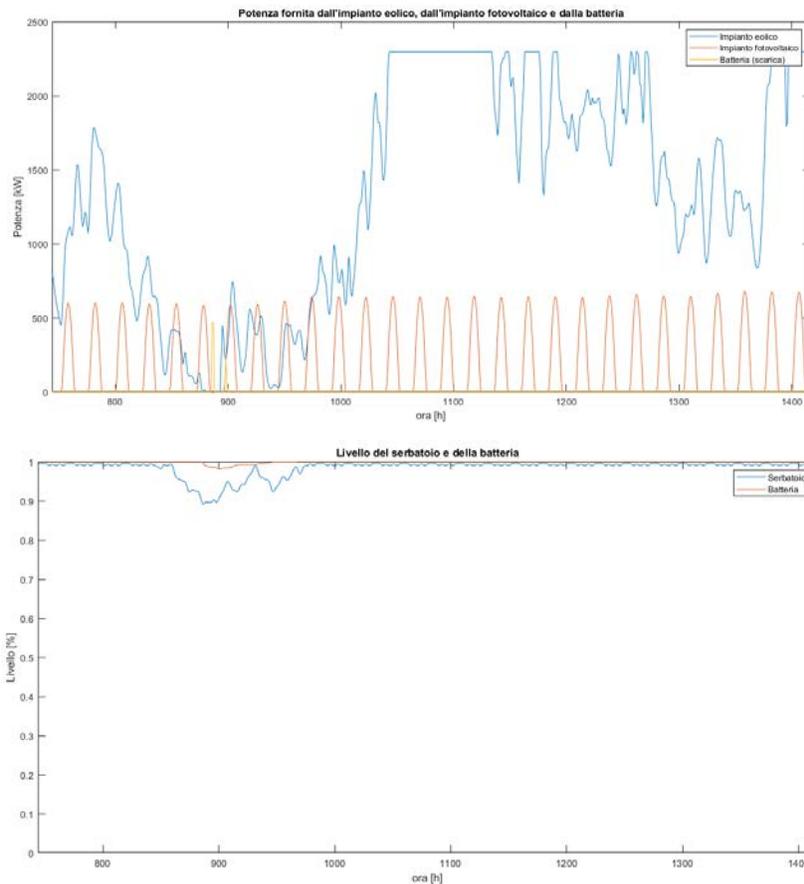
Tabella 6 Valori degli indici tecnici ed economici (Modello con consumo costante)

3.2.2 Risultati modello con consumo specifico variabile

Vengono riportati di seguito gli andamenti orari delle variabili caratterizzanti il funzionamento dell'impianto nel mese di febbraio ed agosto, considerando un consumo specifico variabile.

Gli andamenti che si ottengono con questo modello sono molto simili a quelli che si ottengono considerando un consumo del dissalatore costante e perciò valgono le stesse considerazioni fatte precedentemente.

3.2.2.1 Risultati modello mese di febbraio



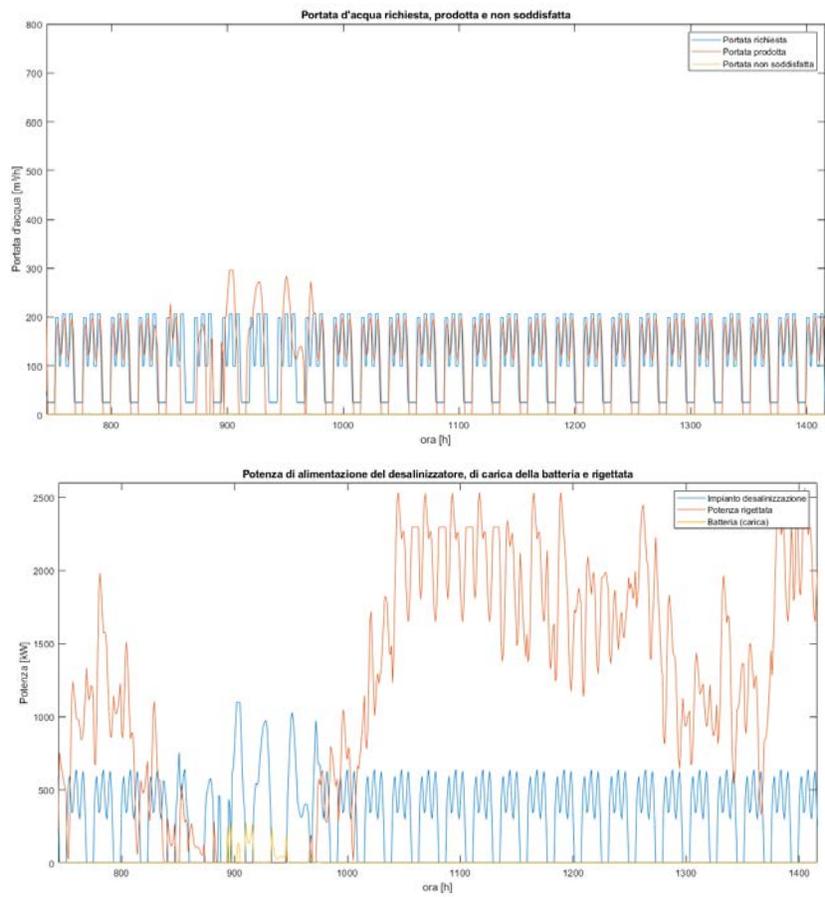


Figura 51 Andamenti orari nel mese di febbraio

3.2.2.2 Risultati modello mese di agosto

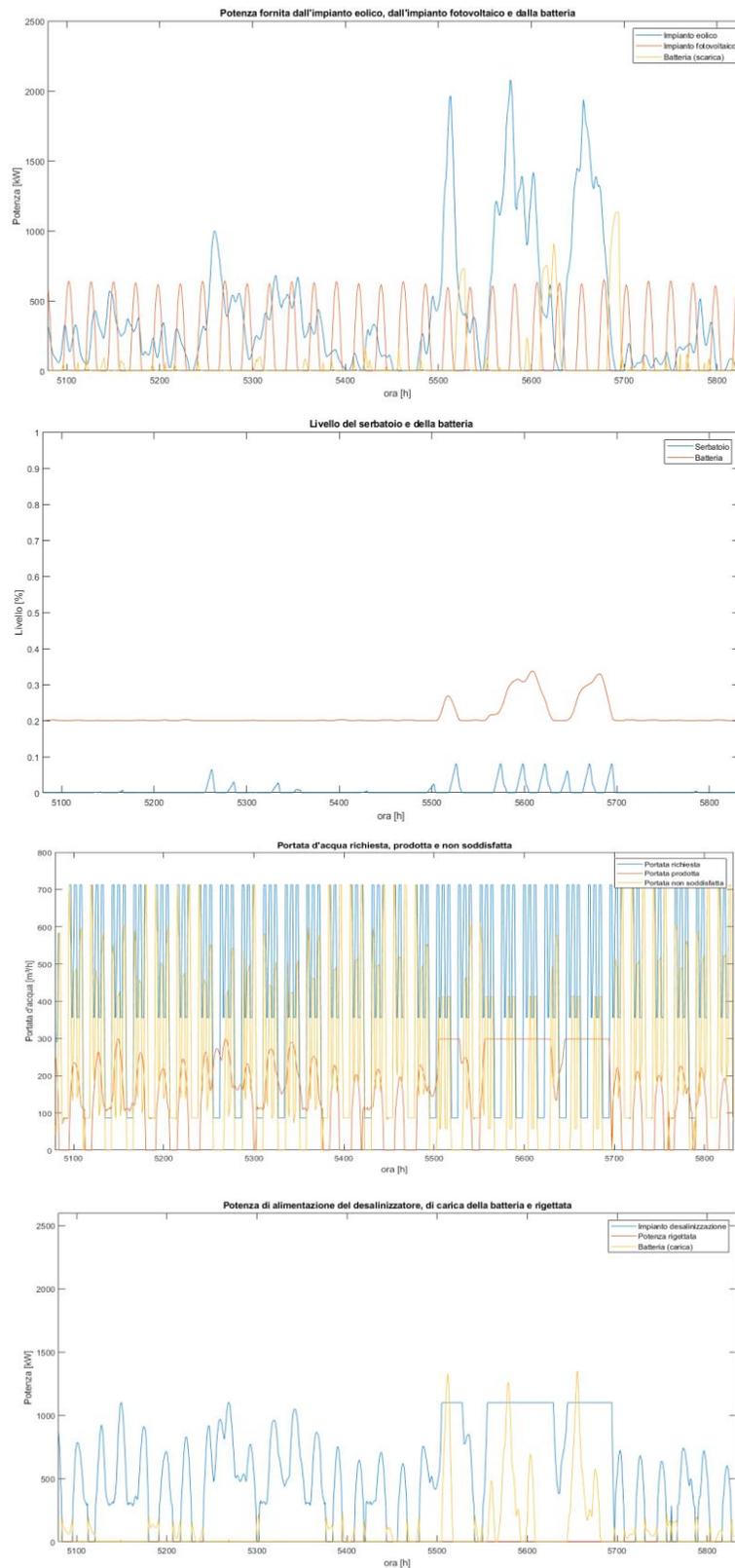


Figura 52 Andamenti orari nel mese di agosto

3.2.2.3 Valori degli indici tecnici ed economici

Nella Tabella 7 vengono riportati i valori degli indici tecnici ed economici, elaborati tramite Simulink.

		Simulink
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	83,23
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	44,06
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore	F_batt [%]	6,39
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	18,14
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	19,89
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	1557700
Costo di produzione dell'acqua	W_cost [€/m ³]	2,98

Tabella 7 Valori degli indici tecnici ed economici (Modello con consumo specifico variabile)

Rispetto al caso precedente, confrontando i risultati ottenuti, gli scostamenti maggiori tra i due modelli, riguardano:

- Il tasso di copertura della domanda d'acqua [%] (86,53 - 83,23)
- La frazione di energia rigettata [%] (48,41 - 44,06)
- La quantità d'acqua prodotta [m³/anno] (1619400 - 1557700)

Queste differenze sono dovute al fatto di aver considerato, nel secondo caso, un consumo specifico del dissalatore variabile con il carico. Soprattutto in estate, quando il carico è massimo, il consumo specifico risulta pari a 3,7 kWh/m³. Se la domanda di acqua è elevata e l'impianto di desalinizzazione lavora a carico nominale costante, un maggior consumo determina una minore portata d'acqua prodotta.

3.3 Valutazioni per l'ottimizzazione dei risultati ottenuti dai due modelli

Prendendo come riferimento i risultati ottenuti con il modello a consumo specifico variabile (si possono fare le stesse valutazioni anche con i risultati ottenuti dal modello a consumo costante), i valori che potrebbero essere migliorati sono, in particolar modo:

- Il tasso di copertura della domanda
- La frazione di energia rigettata
- Costo di produzione dell'acqua

Per cercare di ottimizzare tali valori, si devono osservare i grafici di Figura 52. Come si può vedere, nel mese di agosto, la richiesta d'acqua è maggiore rispetto alla produzione, il serbatoio di accumulo è vuoto e la capacità della batteria quasi sempre al minimo. La prima cosa che si potrebbe pensare di fare è di aumentare la taglia dell'impianto fotovoltaico, in quanto non essendoci molto vento in quel periodo, la potenza fornita al dissalatore è bassa. Aumentando la taglia dell'impianto fotovoltaico di tre volte (2250 kW, equivalenti a 7030 moduli), il tasso di copertura della domanda aumenta fino al 91,44 % (+8,21 punti percentuale), ma come si può vedere dalla Figura 53, la frazione di energia rigettata è molto elevata nei mesi invernali, essa aumenta al 51,77 % (+7,71 punti percentuale).

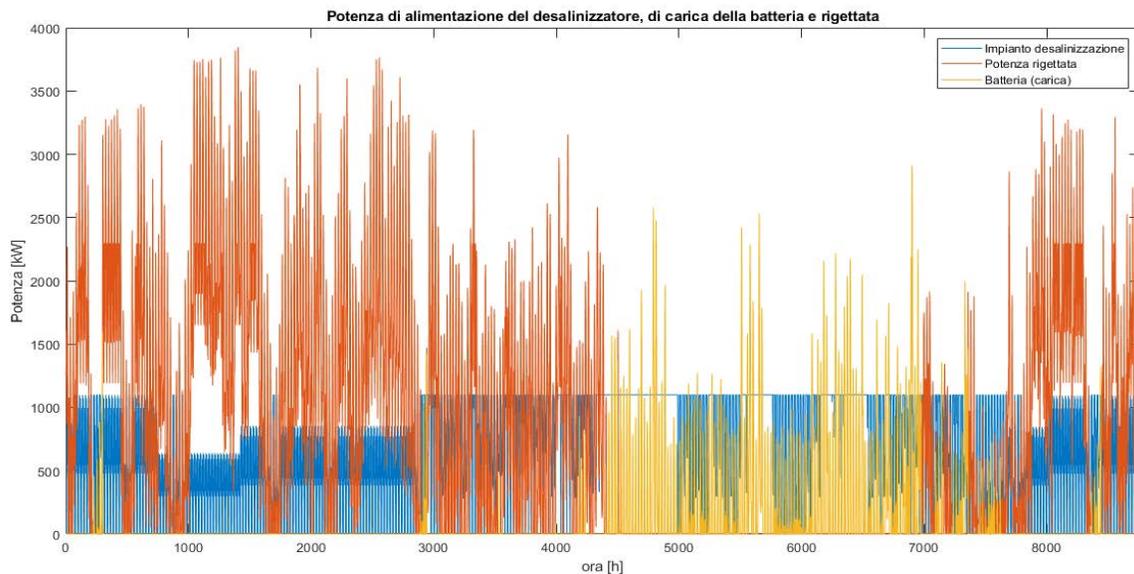


Figura 53 Potenza di alimentazione del dissalatore, di carica della batteria e rigettata

Si potrebbe pensare allora, di accumulare la potenza in eccesso dei mesi invernali nella batteria, aumentandone la capacità. Se si quadruplica la capacità di accumulo (400000 kWh), il valore della copertura d'acqua aumenta al 94,63 % (+3,19 punti percentuale), mentre, la frazione di energia rigettata, diminuisce al 49,15 % (-2,62 punti percentuale). Tuttavia, con un aumento di quattro volte la capacità della batteria, i valori appena trovati non variano in modo significativo, e questo è dovuto al fatto che, nei mesi invernali, la domanda d'acqua è molto inferiore rispetto a quella estiva, il serbatoio è per la maggior parte del tempo sempre pieno, il dissalatore è in grado di funzionare solamente con la potenza proveniente dall'impianto fotovoltaico ed eolico, la batteria risulta essere quasi sempre carica e quindi non è in grado di accumulare la potenza rigettata. Il valore che però aumenta di molto, è il costo di produzione dell'acqua (7,46 €/m³), il quale diventa troppo elevato per rendere conveniente l'istallazione di un impianto di desalinizzazione rispetto all'importazione dell'acqua.

Un altro modo, per cercare di ottimizzare i valori, potrebbe essere quello di aumentare la taglia dell'impianto di desalinizzazione e conseguentemente anche il volume del serbatoio. Aumentando la potenza nominale del dissalatore a 1650 kW (154 recipienti in pressione) e il volume del serbatoio dell'acqua di tre volte (57750 m³), lasciando invariati i valori della batteria (100000 kWh) e la taglia dell'impianto fotovoltaico 750 kW (2345 moduli), il tasso di copertura aumenta solo fino al' 87,11 % (+3,88 punti percentuale) e la frazione di energia rigettata raggiunge il valore di 46,01 % (+1,95 punti

percentuale). I valori appena trovati indicano che, non conviene aumentare di molto la potenza nominale del dissalatore, perché, anche se c'è un aumento del tasso di copertura, c'è un aumento della frazione di energia rigettata. Inoltre, il fattore di contribuzione della batteria risulta essere molto basso (3.52 %), quindi conviene anche aumentare la sua capacità, in modo da diminuire l'energia rigettata ed aumentare il tasso di soddisfazione. Aumentandone il valore di quattro volte (400000 kWh), il tasso di copertura dell'acqua aumenta al 90,28 %, mentre, la frazione di energia rigettata, diminuisce al 42,53%. Per ottenere risultati ancora migliori, bisognerebbe aumentare anche la taglia dell'impianto fotovoltaico (1500 kW), in questo modo, la copertura d'acqua risulta pari al 95,14 %, ma aumenterebbe nuovamente l'energia rigettata (46,93 %), come visibile dalla Figura 54.

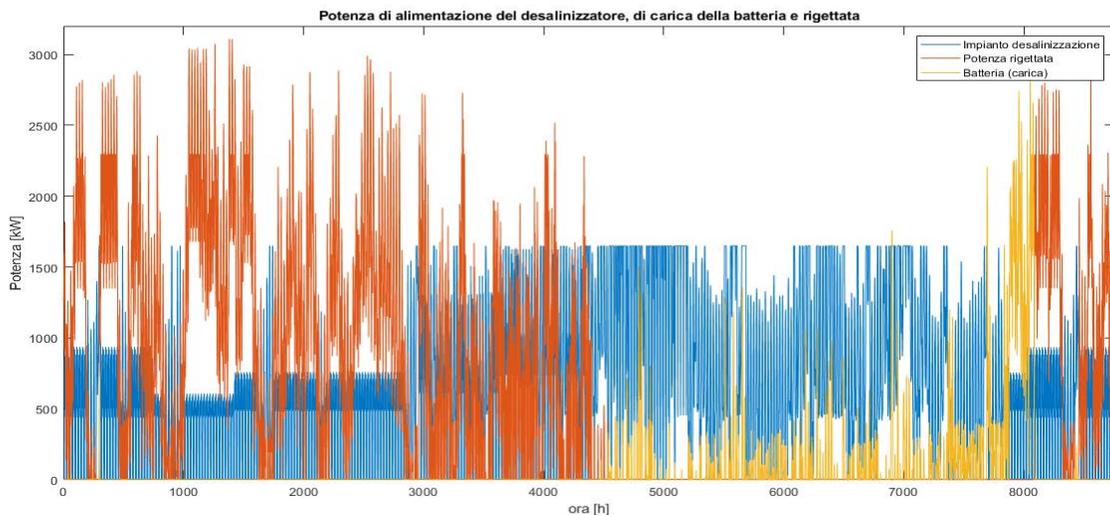


Figura 54 Potenza di alimentazione del dissalatore, di carica della batteria e rigettata

Le valutazioni appena fatte indicano che, anche variando le taglie dei diversi componenti dell'intero impianto, la frazione di energia rigettata è sempre molto elevata, quindi, si può pensare di fornire potenza anche ad un carico elettrico, in modo tale da sfruttarla al meglio. La nuova configurazione con l'aggiunta del carico elettrico verrà trattata nel prossimo capitolo.

Capitolo IV

Realizzazione impianto per copertura fabbisogno idrico ed elettrico

4.1 Layout dell'impianto

Lo schema che si vuole studiare è riportato in Figura 55.

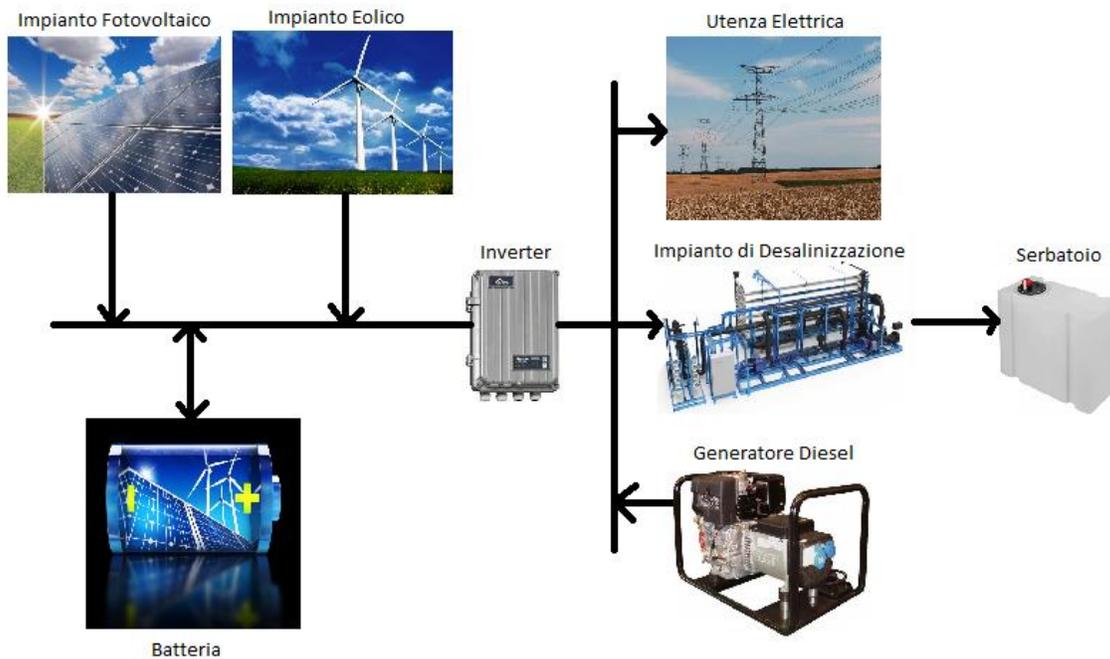


Figura 55 Schema dell'impianto per la copertura del fabbisogno idrico ed elettrico [21][22][23][24][25][26][27][28]

Il sistema in questa seconda configurazione è costituito da un impianto fotovoltaico e uno eolico, una batteria, un inverter, un dissalatore e un serbatoio, come nella prima configurazione, ma con l'aggiunta di un generatore diesel per soddisfare completamente anche il fabbisogno elettrico. Il generatore diesel funziona solamente per cedere potenza al carico elettrico nel caso in cui la potenza fornita dagli impianti di generazione e della batteria non siano sufficienti.

4.2 Fabbisogno elettrico e generatore diesel

Il funzionamento dei vari componenti ed il fabbisogno idrico sono analoghi a quelli già studiati nel paragrafo 2.3. Le uniche differenze riguardano l'aggiunta del generatore diesel e del carico elettrico.

4.2.1 Fabbisogno elettrico

Per soddisfare il fabbisogno elettrico degli utenti è necessario conoscere il carico elettrico, che è continuamente variabile e dipende dal numero di utenze, dalla loro tipologia e dal periodo considerato. Le tipologie di utenze considerate in questa tesi sono quella alberghiera e quella condominiale, con l'ipotesi che i residenti abitino all'interno di condominii, mentre metà dei turisti alloggi in strutture alberghiere e l'altra metà in strutture condominiali.

Date queste ipotesi, sono stati considerati i consumi giornalieri per l'utenza alberghiera e per quella condominiale espressi in [kWh/(m³·giorno)], i quali dipendono dal mese considerato. Poiché i dati sono espressi per unità di volume e non per persona, si è dovuto valutare un volume indicativo sia per i condominii sia per gli alberghi. A tal proposito sono state considerate delle caratteristiche medie di volume e di occupazione delle due tipologie di utenze:

- un'utenza alberghiera con 350 posti letto presenta un volume medio di 43000 m³;
- un appartamento per un nucleo familiare medio di 4.06 persone presenta un volume medio di 318 m³.

Utilizzando questi dati, sono stati calcolati i seguenti due rapporti di volume per persona con cui valutare i valori dei consumi giornalieri di energia elettrica per unità di persona:

$$Rapp_{albergo} = \frac{43000 \text{ m}^3}{350 \text{ persone}} = 122.86 \frac{\text{m}^3}{\text{persona}}$$

$$Rapp_{condominio} = \frac{318 \text{ m}^3}{4.06 \text{ persone}} = 78.33 \frac{\text{m}^3}{\text{persona}}$$

Conoscendo il numero di persone che ogni mese alloggiano negli alberghi e nei condominii, è stato calcolato per entrambe le utenze il consumo giornaliero di energia elettrica relativo ad ogni mese, espresso in [kWh/giorno].

Partendo da questi dati, per valutare l'andamento orario del carico elettrico, sono state utilizzate le curve orarie di carico, sia per l'utenza condominiale sia per quella alberghiera. Poiché tali curve dipendono dalla stagione considerata, per ogni tipologia di utenza sono presenti due curve, una per la stagione invernale e una per quella estiva. Anche in questo caso il carico elettrico ad ogni ora del giorno è espresso come percentuale del consumo giornaliero.

Dunque, una volta calcolato per ognuna delle utenze l'andamento orario del carico elettrico del giorno tipo di ogni mese, ipotizzando che il carico orario giornaliero sia uguale per ogni giorno dello stesso mese e sommando i dati di potenza richiesta per le due utenze, si ottiene l'andamento orario del carico elettrico per un intero anno. [10]

Le curve di carico orario utilizzate, sono quelle dell'articolo [43], adattate al caso studio di questa tesi (Figura 56).

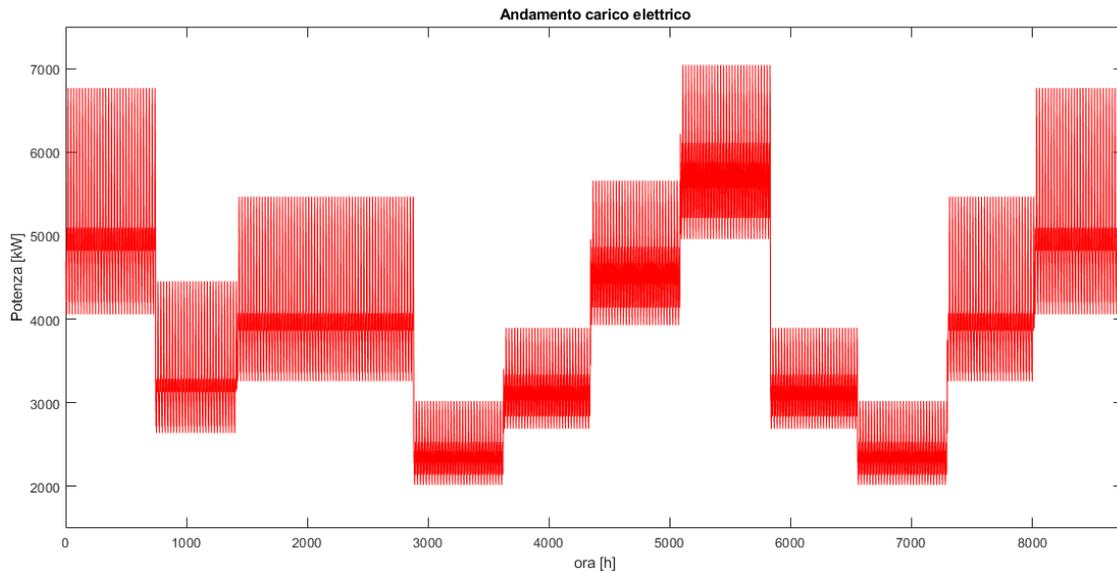


Figura 56 Andamento della curva del carico elettrico

4.2.2 Generatore diesel

Il consumo di carburante del generatore è espresso in funzione della potenza generata secondo la relazione:

$$F_G = B \cdot P_{diesel_nom} + A \cdot P_{diesel}$$

dove F_G [L/h] è la portata volumetrica di carburante consumato, P_{diesel_nom} [kW] è la potenza nominale del generatore diesel, P_{diesel} [kW] è la potenza che viene fornita dal generatore, A e B [L/kWh] sono dei coefficienti relativi alla curva di consumo di carburante: A è la pendenza della curva e B è l'intercetta. I valori di questi due coefficienti che si trovano in letteratura sono $A=0.246$ L/kWh e $B=0.08145$ L/kWh [30].

4.3 Funzionamento impianto con generatore diesel

Il funzionamento dell'impianto è analogo a quello visto nel paragrafo 2.4, tranne per l'aggiunta del generatore diesel. Esso viene utilizzato come ultimo sistema per la generazione di potenza ed entra in funzione solamente per coprire il fabbisogno elettrico che non viene soddisfatto dai restanti impianti di produzione (eolico, fotovoltaico, batteria). Esso quindi, lavora a carico variabile.

4.4 Indici tecnici

Oltre agli indici tecnici visti nel paragrafo 2.5, se ne aggiungono altri, riguardanti il carico elettrico e il generatore diesel. [10]

- **Tasso di contribuzione della batteria al carico elettrico**, il quale indica il contributo della batteria per la fornitura di energia al carico elettrico, ed è dato dal rapporto tra la totale energia che la batteria fornisce al carico e la totale energia che il carico elettrico richiede in un anno:

$$F_{BATT,EL} = \frac{E_{batt_el_anno}}{E_{el_anno}} = \frac{\sum_{j=1}^{8760} P_{scarica_el} \cdot \eta_{inv}}{\sum_{j=1}^{8760} P_{el}}$$

- **Tasso di contribuzione del generatore diesel al carico elettrico**, il quale indica il contributo del generatore diesel alla fornitura di energia al carico elettrico, ed è dato dal rapporto tra la totale energia che il generatore fornisce al carico e la totale energia che il carico elettrico richiede in un anno:

$$F_{DIESEL} = \frac{E_{diesel_anno}}{E_{el_anno}} = \frac{\sum_{j=1}^{8760} P_{diesel}}{\sum_{j=1}^{8760} P_{el}}$$

- **Numero di ore di funzionamento del generatore diesel**, utile per capire quante ore all'anno lavora il generatore.
- **Fattore di capacità del generatore diesel**:

$$CF_{diesel} = \frac{\sum_{j=1}^{8760} P_{diesel}}{P_{diesel_nom} \cdot 8760}$$

4.5 Indici economici

Per quanto riguarda gli indici economici, oltre a quelli visti nel paragrafo 2.6, se ne aggiungono altri, riguardanti il generatore diesel e il costo di produzione dell'energia. [10]

- **Generatore diesel**

Le equazioni relative ai costi di tale impianto, sono state ricavate dall'articolo [30], e sono le seguenti:

$$IC_{diesel} = 1340 \cdot P_{diesel,nom}$$

$$OM_{diesel} = 0.1 \cdot IC_{diesel}$$

$$FC = p_{fuel} \cdot V_{fuel}$$

$$V_{fuel} = \sum_{j=1}^n F_G$$

Dove p_{fuel} è il prezzo del combustibile, ovvero del diesel, che a Capo Verde è di circa 1.07 €/L [35] e V_{fuel} è il totale volume di combustibile consumato in un anno, il quale è espresso in [L/anno].

- **Costo di produzione dell'acqua e dell'energia**

Poiché alcuni componenti dell'impianto vengono utilizzati sia per la produzione di acqua desalinizzata sia per la copertura del carico elettrico, i rispettivi costi devono essere suddivisi tra i due prodotti dell'impianto. Tale suddivisione viene fatta pesando i costi totali dei componenti comuni mediante dei fattori, che indicano la frazione di energia assorbita da ciascuno dei due carichi rispetto all'energia totale assorbita da entrambi i carichi. I costi relativi all'impianto di desalinizzazione vengono attribuiti solamente all'acqua desalinizzata, mentre i costi relativi al generatore vengono imputati solamente al carico elettrico.

Il costo di produzione dell'acqua, espresso in [€/m³], è quindi dato dalla relazione:

$$W_{cost} = \frac{[(IC_{wt} + IC_{pv} + IC_{inv} + IC_{bat})f_a + OM_{wt} + OM_{pv} + OM_{inv}] \cdot F_{des} + IC_{des} \cdot f_a + OM_{des}}{W_{AP}}$$

$$F_{des} = \frac{E_{desal}}{E_{desal} + E_{el} - E_{diesel}}$$

$$f_a = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}}$$

Il fattore F_{des} indica la frazione di energia rinnovabile prodotta che viene assorbita dall'impianto di desalinizzazione e f_a è il fattore che tiene conto del deprezzamento annuale del costo d'investimento, r è il tasso di sconto dell'investimento ed n è il numero di anni di vita dell'impianto.

Il costo di produzione dell'energia, espresso in [€/kWh], è dato dalla relazione:

$$E_{cost} = \frac{[(IC_{wt} + IC_{pv} + IC_{inv} + IC_{bat})f_a + OM_{wt} + OM_{pv} + OM_{inv}]F_{el} + IC_{diesel} \cdot f_a + OM_{diesel} + FC}{E_{el}}$$

$$F_{el} = \frac{E_{el} - E_{diesel}}{E_{des} + E_{el} - E_{diesel}}$$

Il fattore F_{el} indica la frazione di energia rinnovabile prodotta che viene assorbita dal carico elettrico.

4.6 Dimensionamento componenti

In questa seconda configurazione la taglia dell'impianto eolico, di quello fotovoltaico e della batteria, viene aumentata a causa dell'aggiunta del carico elettrico. Infatti, se i valori dei componenti fossero gli stessi del paragrafo 3.1, la frazione di energia rigettata sarebbe pari a zero, la batteria cedrebbe la propria energia all'inizio per poi essere sempre scarica e il fabbisogno elettrico non sarebbe mai soddisfatto.

Nella Tabella 8 vengono elencati i valori delle taglie dei vari componenti d'impianto, che sono state assunte per questa configurazione.

Componente	Taglia
Potenza installata fotovoltaico [kW]	6000
Potenza installata eolico [kW]	5950
Capacità nominale batteria [kWh]	200000
Potenza nominale dissalatore [kW]	1100
Capacità serbatoio [m ³]	19250
Potenza nominale generatore diesel [kW]	7041,4

Tabella 8 Taglia dei componenti dell'impianto

Come visibile in tabella, la potenza del fotovoltaico è uguale a 6000 kW, corrispondente all'installazione di 18750 moduli, la potenza dell'eolico è uguale a 5950 kW, corrispondente all'installazione di 7 turbine eoliche, mentre la capacità della batteria è stata fissata a 200000 kWh. Infine, la potenza nominale del generatore diesel, è stata imposta pari al carico elettrico massimo (7041,4 kW), questo perché, anche senza la produzione di potenza dagli impianti di generazione, il fabbisogno elettrico deve essere sempre soddisfatto.

4.7 Risultati modello

I risultati di questa seconda configurazione vengono riportati nella Tabella 9.

Parametro	Simbolo	Valore
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	89,66
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	3,54
Frazione di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del dissalatore	F_batt [%]	0,36
Frazione di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del carico elettrico	F_batt_el [%]	10,79
Frazione di contribuzione del gen diesel alla fornitura di energia del carico elettrico	F_diesel [%]	31,48
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	24,23
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	36,35
Fattore di capacità del gen diesel	CF_diesel [%]	17,49
Numero di ore di funzionamento del gen diesel	n_ore_funz	3505
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	1671700
Costo di produzione dell'acqua desalinizzata	W_cost [€/m ³]	1,74
Costo di produzione dell'energia elettrica	E_cost [€/kWh]	0,46

Tabella 9 Risultati della configurazione con carico elettrico e generatore diesel

Confrontando i risultati ottenuti con quelli trovati nella prima configurazione (cioè quella senza il carico elettrico ed il generatore diesel), gli scostamenti maggiori riguardano:

- Il tasso di copertura della domanda d'acqua [%] (83,23 - 89,66)
- La frazione di energia rigettata [%] (44,06 - 3,54)
- La quantità d'acqua prodotta [m³/anno] (1557700 - 1671700)
- Il costo di produzione dell'acqua desalinizzata [€/m³] (2,98 - 1,74)

Risulta subito evidente che i risultati appena trovati siano migliori con l'aggiunta del carico elettrico. Il tasso di copertura della domanda idrica aumenta (+6,43 punti percentuale), il costo di produzione dell'acqua desalinizzata diminuisce (-1,24 €/m³), ma soprattutto la frazione di energia rigettata diminuisce di molto (-40,52 punti percentuale). Si nota che, l'energia contenuta nella batteria viene prevalentemente usata dal carico elettrico (10,79 %) e solo una minima parte di essa viene utilizzata per il desalinizzatore (0,36 %), questo perché, il carico elettrico è assai più elevato della potenza nominale dell'impianto di desalinizzazione, la batteria quindi, tende a scaricarsi molto più frequentemente (Figura 57), per cedere la propria energia, quando la potenza rinnovabile non è sufficiente a coprire il fabbisogno elettrico.

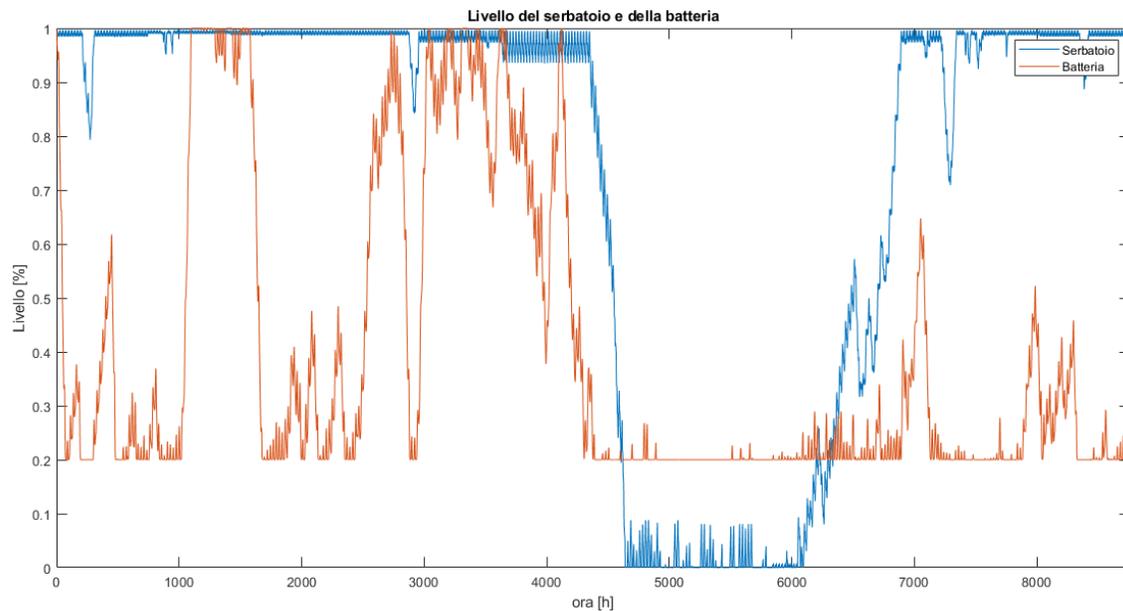


Figura 57 Livello del serbatoio e della batteria

Per quanto riguarda l'impianto eolico e quello fotovoltaico, il loro fattore di capacità aumenta rispettivamente di 16,46 punti percentuali e 6,09 punti percentuali, queste differenze sono dovute al fatto di avere considerato la loro potenza installata molto maggiore rispetto alla prima configurazione. Anche il generatore diesel contribuisce a coprire il fabbisogno elettrico (31,48 %) e il suo fattore di capacità risulta del 17,49 %. Come si può vedere dalla Figura 58, esso funziona soprattutto in estate, a causa dell'aumento della popolazione e quindi ad un aumento sia della domanda d'acqua sia del carico elettrico.

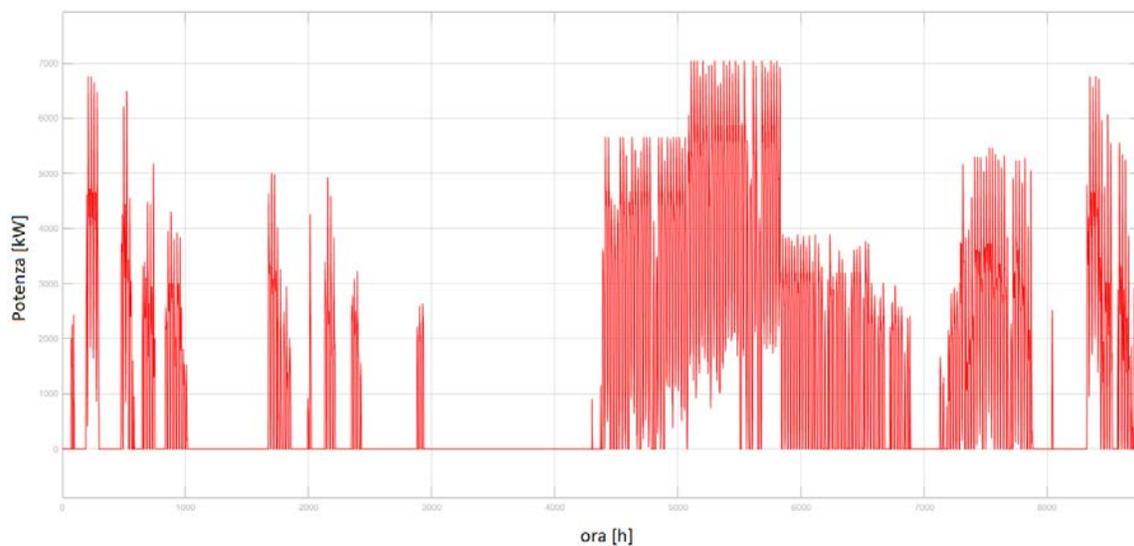


Figura 58 Potenza del generatore diesel

Infine, il costo di produzione dell'acqua è di 1.74 €/m³, il quale è più basso del costo dell'acqua che viene importata nell'isola, che è di circa 5 €/m³, mentre il costo di produzione dell'energia è di 0.46 €/kWh.

I risultati che si ottengono con questa configurazione sono dunque migliori di quelli della prima configurazione, in cui si fornisce solamente acqua dissalata, perciò grazie all'aggiunta del carico elettrico l'energia prodotta viene sfruttata in modo migliore.

4.8 Valutazioni per l'ottimizzazione dei risultati ottenuti

Anche con questa configurazione, come si è fatto nel paragrafo 3.3, si possono valutare i risultati ottenuti e cercare di ottimizzarli. I valori che potrebbero essere migliorati sono, in particolar modo:

- Il tasso di copertura della domanda
- La frazione di energia rigettata
- Il Costo di produzione dell'acqua e dell'energia

Per cercare di far aumentare il tasso di copertura della domanda, si potrebbero aumentare le potenze installate degli impianti di generazione (eolico, fotovoltaico), ma così facendo, a fronte di un piccolo incremento del tasso di copertura del fabbisogno idrico e un costo di produzione dell'acqua e dell'energia un po' minore, la frazione di energia rigettata aumenterebbe in modo significativo. Se invece, si volesse diminuire la frazione di energia rigettata, si potrebbe diminuire la potenza installata degli impianti di generazione, ma in questo modo, il costo di produzione dell'acqua e dell'energia aumenterebbero, in quanto, per riuscire a coprire la quota rimanente del carico elettrico, il generatore diesel è costretto a funzionare un numero di ore maggiore, e questo comporta un aumento dei costi.

In definitiva, se si vogliono ottimizzare i risultati, si devono valutare diversi casi e compensare le soluzioni, questo verrà fatto nei prossimi capitoli.

Capitolo V

Ottimizzazione del costo dell'acqua

L'obiettivo del lavoro presentato in questo capitolo è quello di individuare le taglie dei diversi componenti al fine di minimizzare il costo di produzione dell'acqua desalinizzata. Le variabili di ottimizzazione sono:

- il numero di turbine eoliche, ciascuna di potenza nominale di 850 kW;
- il numero di moduli fotovoltaici, ognuno dei quali ha una potenza di picco di 320 W;
- la potenza nominale dell'impianto ad osmosi inversa;
- il volume del serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua desalinizzata;
- la capacità totale delle batterie di accumulo dell'energia.

Per effettuare l'ottimizzazione dell'impianto oggetto di studio di questa tesi è stato utilizzato l'algoritmo genetico presente all'interno di Matlab.

5.1 Algoritmo genetico

Un algoritmo genetico è un algoritmo euristico utilizzato per tentare di risolvere problemi di ottimizzazione. L'aggettivo "genetico", ispirato al principio della selezione naturale ed evoluzione biologica teorizzato nel 1859 da Charles Darwin, deriva dal fatto che, al pari del modello evolutivo darwiniano che trova spiegazioni nella branca della biologia detta genetica, gli algoritmi genetici attuano dei meccanismi concettualmente simili a quelli dei processi biochimici scoperti da questa scienza. In sintesi, gli algoritmi genetici permettono di valutare diverse soluzioni di partenza (come se fossero diversi individui biologici): ricombinandole (analogamente alla riproduzione biologica sessuata) ed introducendo elementi di disordine (analogamente alle mutazioni genetiche casuali) producono nuove soluzioni (nuovi individui) che vengono valutate scegliendo le migliori (selezione ambientale) nel tentativo di convergere verso soluzioni "di ottimo". Ognuna di queste fasi di ricombinazione e selezione si può chiamare generazione come quelle degli esseri viventi. [45]

5.1.1 L'algoritmo genetico in Matlab

Per l'ottimizzazione dell'impianto studiato in questa tesi è stato utilizzato l'algoritmo genetico presente all'interno di Matlab, la cui funzione per richiamarlo è la seguente [46][10]:

```
[x, fval]=ga(fun,nvars,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,IntCon,options)
```

- fun è la funzione di fitness, la quale rappresenta la funzione obiettivo del problema di ottimizzazione. Essa è strutturata in modo tale da accettare in ingresso un certo vettore x, in cui ogni elemento rappresenta una variabile di ottimizzazione, e restituisce un valore scalare

- $nvars$ è il numero di variabili da ottimizzare, nonché il numero di elementi del vettore x , il quale rappresenta un certo individuo della popolazione
- A e b sono rispettivamente una matrice e un vettore che rappresentano i vincoli lineari di disuguaglianza delle variabili di ottimizzazione scritti nella forma di sistema:

$$A \cdot x < b$$

A è una matrice il cui numero di righe è uguale al numero di vincoli lineari di disuguaglianza e il numero di colonne è pari al numero di elementi del vettore x , mentre b è il termine noto del sistema.

- A_{eq} e b_{eq} sono invece la matrice e il vettore che descrivono i vincoli lineari di uguaglianza:

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq}$$

- lb e ub sono due vettori che rappresentano rispettivamente il limite inferiore e superiore delle variabili di ottimizzazione.
- $nonlcon$ sono i vincoli non lineari che vengono scritti come funzione che accetta in ingresso il vettore x e restituisce in uscita due vettori $c(x)$ e $ceq(x)$, che rappresentano rispettivamente i vettori dei vincoli non lineari di disuguaglianza e di uguaglianza che devono essere soddisfatti:

$$\begin{aligned} c(x) &< 0 \\ ceq(x) &= 0 \end{aligned}$$

- $IntCon$ rappresenta un vettore in cui viene specificato quali delle variabili di ottimizzazione devono essere considerate come numeri interi. Ogni elemento di tale vettore rappresenta un componente di x che è un numero intero.
- $Options$ sono le opzioni di ottimizzazione. Le opzioni che sono state utilizzate sono la dimensione della popolazione, il numero di generazioni, l'élite count, la tolleranza della funzione di fitness e della funzione di vincolo.

L'algoritmo viene iterato finché si giunge ad uno dei seguenti criteri di stop:

- Massimo numero di generazioni: l'algoritmo termina perché viene raggiunto il numero massimo di generazioni stabilito;
- Limite di tempo: l'algoritmo termina perché viene raggiunto il limite di tempo impostato;
- Limite della funzione di fitness: l'algoritmo termina quando il migliore valore della funzione di fitness è inferiore ad un certo valore limite;
- Stallo di tempo limite: l'algoritmo si arresta perché non c'è miglioramento nel miglior valore della funzione di fitness per un certo intervallo di tempo specificato;
- Tolleranza della funzione: l'algoritmo termina quando la variazione relativa media del miglior valore della funzione di fitness è inferiore o uguale alla tolleranza della funzione.

5.2 Limiti delle variabili di ottimizzazione

I valori delle diverse variabili di ottimizzazione sono definiti attraverso un limite superiore ed uno inferiore, in modo tale che esse possano appartenere ad un determinato dominio. Nella Tabella 10 sono riportati i limiti (inferiore e superiore) delle variabili di ottimizzazione.

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	3	4
Numero moduli fotovoltaici	7031	9375
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	1100	1650
Volume serbatoio [m ³]	57750	77000
Capacità batterie [kWh]	50000	100000

Tabella 10 Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione

N.B. I valori sono stati assunti in base ai ragionamenti fatti nel paragrafo 3.3.

Come limite inferiore di turbine eoliche è stato impostato un valore pari a 3, mentre come limite superiore un valore pari a 4 (valori corrispondenti rispettivamente ad una potenza di 2550 kW e 3400 kW). Il numero dei moduli fotovoltaici è compreso tra i 7031 e i 9375, il limite inferiore corrisponde ad una potenza nominale dell'impianto fotovoltaico di 2250 kW, mentre il limite superiore corrisponde alla potenza di 3000 kW. La potenza complessiva installata dai due impianti di produzione è molto maggiore rispetto alla potenza nominale massima richiesta dal dissalatore (1650 kW), questo è dovuto all'aleatorietà delle fonti di produzione di potenza considerate. Per quanto riguarda il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua viene considerato come limite inferiore il valore di 57750 m³. Il limite superiore, invece, è di 77000 m³.

Per la capacità delle batterie di accumulo viene considerato l'intervallo di 50000-100000 kWh, in quanto si è visto che assumendo dei valori non troppo elevati di capacità, unitamente a valori più elevati della potenza installata degli impianti di produzione dell'energia, si ottengono buoni risultati in termini di costo di produzione e tasso di copertura della domanda d'acqua.

Inoltre, ognuna delle variabili di ottimizzazione può assumere solamente valori interi: ciò viene quindi specificato all'interno del comando per eseguire l'algoritmo di ottimizzazione.

5.3 Vincoli non lineari

Oltre ai limiti imposti alle variabili di ottimizzazione, devono essere soddisfatti anche altri vincoli. In particolare, si vuole che il tasso di soddisfazione della domanda idrica sia compreso tra il 94% e il 100% e che la percentuale di energia rigettata sia inferiore a 65%.

Il vincolo sul tasso di soddisfazione è imposto in quanto si vuole che tale valore sia il più elevato possibile, altrimenti la finalità dell'impianto di desalinizzazione verrebbe a mancare. Si impone che tale parametro possa variare tra il 94% e il 100% in quanto una copertura totale è difficile da raggiungere e questo richiederebbe un sovradimensionamento eccessivo dei componenti dell'impianto, che determinerebbe anche un maggiore costo di produzione dell'acqua desalinizzata.

Si inserisce anche il vincolo sulla percentuale di energia rigettata in quanto si vuole evitare che una grande quantità dell'energia prodotta dagli impianti a fonte rinnovabile venga rigettata a causa di un sovradimensionamento eccessivo degli stessi. Si è scelto che la percentuale dell'energia rigettata debba essere inferiore a 65%, valore abbastanza elevato ma che assicura l'esistenza della soluzione ottimale nell'intervallo dato. [10]

5.4 Parametri prestazionali

I parametri prestazionali dell'algoritmo genetico che vengono impostati sono la dimensione della popolazione, il numero di generazioni, l'élite count, le tolleranze della funzione di fitness e della funzione di vincolo.

La dimensione della popolazione definisce il numero di individui da cui essa è composta, mentre il numero di generazioni indica il numero di popolazioni che vengono testate dall'algoritmo per la ricerca della soluzione ottimale. Maggiori sono questi due parametri più accurati sono i risultati dell'ottimizzazione, ma il calcolo diventa più oneroso e perciò il tempo computazionale diventa maggiore. L'élite count definisce il numero di individui migliori che vengono trasmessi alla generazione successiva senza subire modifiche. Il valore di tale parametro che viene imposto è $0.08 \cdot \text{pop}$, dove pop è la dimensione della popolazione. Infine, la tolleranza della funzione di fitness e della funzione di vincolo, indicano le tolleranze che stabiliscono il raggiungimento di un certo criterio di stop dell'algoritmo. [10]

5.5 Risultati dell'ottimizzazione

Per ottenere i risultati riportati nella Tabella 11 sono state eseguite diverse simulazioni con popolazioni e generazioni diverse per valutare l'accuratezza dei risultati dell'ottimizzazione.

Pop	Gen	Toll	N_wt	N_pv	P_di [kW]	V_tc [m ³]	E_batt_nom [kWh]	Costo acqua [€/m ³]	F_ds [%]	F_rej [%]
40	50	10^{-3}	3	7310	1100	76597	50003	2.11	94,02	50,75
80	100	10^{-5}	3	7564	1100	76313	50000	2.11	94,23	51,16

Tabella 11 Risultati dell'ottimizzazione

La prima ottimizzazione è stata eseguita considerando una popolazione pari a 40 ed un numero di generazioni pari a 50. Con questi valori l'ottimizzazione termina per il raggiungimento del numero massimo di generazioni. La seconda ottimizzazione è stata eseguita considerando una popolazione pari a 80 ed un numero di generazioni pari a 100. Con questi valori l'ottimizzazione termina perché la variazione media del valore della funzione obiettivo è inferiore alla tolleranza imposta, perciò l'algoritmo giunge a convergenza. Il costo dell'acqua ottenuto dalle due ottimizzazioni risulta pari a 2.11 €/m³ e i vincoli sul tasso di copertura della domanda di acqua e sulla percentuale di energia rigettata vengono entrambi rispettati.

Nelle simulazioni le variazioni dei risultati sono minime e non influenzano il valore del costo di produzione dell'acqua. Pertanto, si può concludere che le simulazioni effettuate conducono agli stessi risultati.

Confrontando i risultati ottenuti con quelli della configurazione non ottimizzata riportata nel capitolo III, si può osservare che la soluzione ottimizzata presenta dei risultati decisamente migliori in termini di costo di produzione dell'acqua dissalata e di tasso di soddisfazione della domanda idrica. Infatti la configurazione non ottimizzata presentava un costo di produzione dell'acqua di 2.98 €/m³ ed un tasso di soddisfazione della domanda dell'83,23%, mentre gli stessi parametri nella soluzione ottimizzata sono rispettivamente pari a 2.11 €/m³ e al 94%.

Nelle simulazioni eseguite, il tasso di soddisfazione dell'acqua è inferiore al 100%, quindi, per giungere alla totale copertura del carico idrico deve essere importata nell'isola una certa quantità d'acqua. Considerando che il costo dell'acqua importata all'interno di serbatoi è di circa 5 €/m³, oltre al costo di produzione dell'acqua viene calcolato anche il costo medio dovuto alla sua produzione ed importazione. L'equazione utilizzata per il calcolo di tale costo è:

$$C_{medio} = C_{prod} \cdot F_{ds} + C_{importata} \cdot (1 - F_{ds})$$

- C_{prod} è il costo di produzione dell'acqua;
- $C_{importata}$ è il costo dell'acqua che viene importata;
- C_{medio} è il costo medio tra il costo di produzione e il costo dell'acqua importata;
- F_{ds} è il tasso di soddisfazione del carico idrico mediante l'impianto di dissalazione.

In base alle valutazioni fatte riguardo al tasso di soddisfazione, al costo dell'acqua prodotta e da quella importata nella configurazione ottimizzata e in quella non ottimizzata, il costo medio risultante dall'ottimizzazione è di 2.28 €/m³, mentre il costo medio dell'acqua nella configurazione non ottimizzata risulta pari 3.31 €/m³ (+1.03 €/m³).

I risultati ottenuti dall'ottimizzazione sono migliori grazie all'aumento della potenza installata dell'impianto fotovoltaico, del volume del serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua e alla diminuzione della capacità del sistema di batterie (come si era già osservato nel paragrafo 3.3).

Per quanto riguarda la percentuale di energia rigettata, essa risultava pari al 44,06% nella configurazione non ottimizzata mentre risulta pari al 51% nella configurazione ottimizzata. Questa differenza è dovuta al fatto che gli impianti di produzione sono sovradimensionati a causa dell'aleatorietà delle fonti rinnovabili. Dai risultati dell'ottimizzazione si ottengono i grafici del livello del serbatoio di stoccaggio dell'acqua desalinizzata e del livello della batteria di accumulo dell'energia, riportati in Figura 59.

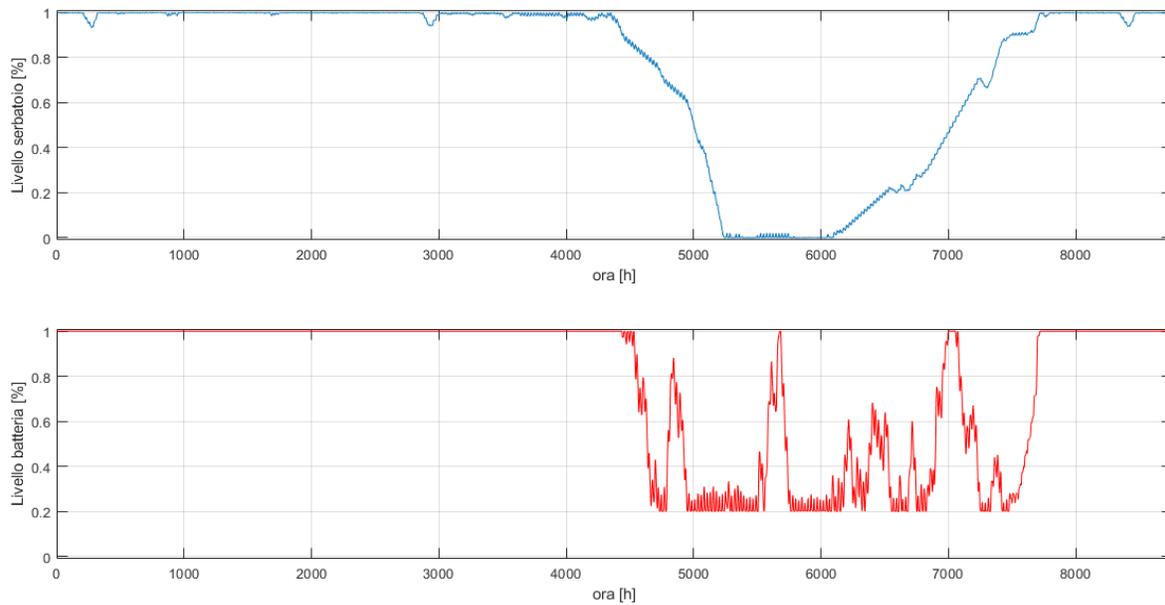


Figura 59 Grafici del livello del serbatoio e del livello della batteria

Come si può notare dai due grafici, il livello del serbatoio è al minimo o completamente vuoto nel periodo estivo a causa dell'elevata richiesta d'acqua dovuta al flusso turistico. Per quanto riguarda la batteria, essa continua a caricarsi e scaricarsi nei mesi estivi, mentre è sempre carica nel rimanente periodo dell'anno.

Capitolo VI

Ottimizzazione della configurazione d'impianto di desalinizzazione e fornitura di energia elettrica

Rispetto al caso precedente, nella configurazione dell'impianto, oltre ai componenti già visti, è presente il generatore diesel, per coprire il fabbisogno elettrico che non può essere soddisfatto dall'impianto fotovoltaico, eolico e dalla batteria. L'obiettivo in questo capitolo è quello di individuare le taglie dei diversi componenti d'impianto che massimizzano il valore attuale netto dell'investimento (VAN). Le variabili di ottimizzazione sono:

- il numero di turbine eoliche, ciascuna di potenza nominale di 850 kW;
- il numero di moduli fotovoltaici, ognuno dei quali ha una potenza di picco di 320 W;
- la potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa;
- il volume del serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua desalinizzata;
- la capacità totale delle batterie di accumulo dell'energia;

Per effettuare l'ottimizzazione dell'impianto oggetto di studio, è stato utilizzato lo stesso algoritmo del Capitolo V, ma in questo caso l'obiettivo è diverso.

La relazione per il calcolo del valore attuale netto dell'investimento è la seguente:

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=1}^n D_j \cdot (1 + r)^{-j}$$

dove I_0 è il costo d'investimento totale iniziale, D_j sono le entrate derivanti dall'investimento conseguite nell'anno j -esimo, n è il numero di anni di vita dell'investimento, r è il tasso di sconto. Nel caso in esame l'investimento è rappresentato dal costo dell'impianto di dissalazione e da quello di generazione di energia elettrica. La durata di tale impianto viene assunta pari a 20 anni, mentre il tasso di sconto considerato è pari al 5%. Oltre al costo d'investimento totale, il cui esborso viene fatto all'anno $j=0$, si deve tenere conto anche dei costi operativi e di manutenzione sostenuti annualmente. Le entrate sono di due tipi: la vendita dell'acqua dissalata e la vendita dell'energia elettrica. Il prezzo di vendita dell'acqua dissalata viene assunto pari al costo che dovrebbe essere sostenuto per importare la risorsa, ovvero 5 €/m³. Il prezzo di vendita dell'energia elettrica viene assunto pari al costo dell'energia prodotta che si otterrebbe se il carico elettrico venisse servito solamente dal generatore diesel, ossia

0.47 €/kWh. Con queste considerazioni l'equazione per il calcolo del VAN diventa:

$$VAN = -I_0 - \sum_{j=1}^n OM_{totj} \cdot (1+r)^{-j} + \sum_{j=1}^n D_{elj} \cdot (1+r)^{-j} + \sum_{j=1}^n D_{wj} \cdot (1+r)^{-j}$$

- I_0 è il costo d'investimento totale sostenuto all'anno $j=0$, dato dalla somma dei costi d'investimento di tutti i componenti dell'impianto;
- OM_{totj} sono i costi operativi e di manutenzione di tutto l'impianto sostenuti all'anno j -esimo;
- D_{elj} è il flusso di cassa legato alla vendita di energia elettrica, dato dal prodotto tra il prezzo a cui viene venduta l'energia e l'energia totale prodotta dall'impianto in un anno;
- D_{wj} è il flusso di cassa legato alla vendita di acqua dissalata, dato dal prodotto tra il prezzo a cui viene venduta l'acqua e la quantità totale di acqua prodotta dall'impianto in un anno, espressa in m^3 .

I costi dei vari componenti dell'impianto che sono stati utilizzati per il calcolo del VAN sono quelli riportati nei capitoli II e IV. Tra questi è da sottolineare che il generatore diesel, oltre al costo d'investimento e di manutenzione, presenta anche un costo legato al consumo di combustibile, il cui prezzo d'acquisto è stato preso pari a 1.07 €/l. [10]

6.1 Limiti delle variabili di ottimizzazione

I valori delle diverse variabili di ottimizzazione sono definiti attraverso un limite superiore ed uno inferiore, in modo tale che esse possano appartenere ad un determinato dominio. Nella Tabella 12 sono riportati i limiti (inferiore e superiore) delle variabili di ottimizzazione.

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	6	8
Numero moduli fotovoltaici	18750	25000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	1100	1650
Volume serbatoio [m^3]	77000	100000
Capacità batterie [kWh]	50000	100000

Tabella 12 Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione

Come limite inferiore di turbine eoliche è stato impostato un valore pari a 6, mentre come limite superiore un valore pari a 8 (valori corrispondenti rispettivamente ad una potenza di 5100 kW e 6800 kW). Il numero dei moduli fotovoltaici è compreso tra i 18750 e i 25000, il limite inferiore corrisponde ad una potenza nominale dell'impianto fotovoltaico di 6000 kW, mentre il limite superiore corrisponde alla potenza di 8000 kW. Per quanto riguarda il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua viene considerato come limite inferiore il valore di 77000 m^3 . Il limite superiore, invece, è di 100000 m^3 . Per il dissalatore, è stata impostata una potenza nominale tra i 1100 kW e i 1650 kW. Infine per la capacità delle batterie di accumulo viene considerato l'intervallo di 50000-100000 kWh.

6.2 Vincoli non lineari

In questa ottimizzazione vengono considerati dei vincoli sul tasso di soddisfazione della domanda idrica e sulla percentuale di energia rigettata.

Si stabilisce che il tasso di soddisfazione della domanda idrica sia del 100%.

Si vuole invece che la percentuale di energia rigettata sia inferiore al 7%: è stato scelto come vincolo un valore più basso rispetto all'ottimizzazione precedente, perché inserendo il carico elettrico ci si attende una diminuzione dell'energia rigettata.

6.3 Parametri prestazionali

I parametri prestazionali dell'algoritmo genetico che vengono impostati sono:

- Popolazione pari a 50;
- Numero di generazioni pari a 50;
- Élite count pari a $0.08 \cdot \text{pop}$;
- Tolleranza della funzione di fitness pari a 10^{-5} ;
- Tolleranza della funzione di vincolo pari a 10^{-5} .

6.4 Indici tecnico-economici

Per la valutazione dei risultati dell'ottimizzazione oltre al valore attuale netto dell'investimento, vengono utilizzati anche altri indici tecnico-economici. Vengono perciò calcolati il costo dell'acqua dissalata, il costo dell'energia prodotta, il tempo di ritorno dell'investimento (PB), il tasso interno di rendimento dell'investimento (TIR), il tasso di soddisfazione del carico idrico (F_{ds}), del carico elettrico (F_{el}) e la percentuale di energia rigettata (F_{rej}).

Il tempo di ritorno dell'investimento, o *payback time* (PB), indica il numero di anni necessari affinché il costo d'investimento venga recuperato mediante le entrate derivanti dall'investimento stesso e viene calcolato attraverso la seguente equazione:

$$PB = \frac{I_0}{D_{elj} + D_{wj}}$$

Il tasso interno di rendimento (TIR) rappresenta il valore del tasso di attualizzazione che rende nullo il valore attuale netto dell'investimento. Esso perciò viene calcolato nel seguente modo:

$$I_0 = - \sum_{j=1}^n OM_{totj} \cdot (1 + TIR)^{-j} + \sum_{j=1}^n D_{elj} \cdot (1 + TIR)^{-j} + \sum_{j=1}^n D_{wj} \cdot (1 + TIR)^{-j}$$

6.5 Risultati dell'ottimizzazione

Nella Tabella 13 sono riportati i valori delle variabili e gli indici tecnico-economici che si ottengono dal processo di ottimizzazione.

Pop	Gen	Toll	N_wt	N_pv	P_di [kW]	V_tc [m ³]	E_batt_nom [kWh]	Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]
50	50	10 ⁻⁵	7	19198	1644	97237	50005	1.35	0.37

PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_rej [%]
2.12	129,409,080	26.83	100	6.99

Tabella 13 Risultati dell'ottimizzazione

Come si può vedere dalla Tabella 13, il numero di moduli fotovoltaici è pari a 19198, valore corrispondente ad una potenza di 6143 kW, il numero di turbine eoliche è uguale a 7, valore corrispondente ad una potenza installata dell'impianto eolico di 5950 kW. La potenza nominale del dissalatore è pari a 1644 kW, valore molto vicino al limite superiore impostato di 1650 kW. Il volume del serbatoio è pari a 97237 m³, valore che permette la completa copertura del fabbisogno idrico. Infine per quanto riguarda la batteria, essa tende al limite inferiore, in quanto come si è visto nei capitoli precedenti, con dei valori non troppo elevati di capacità, unitamente a valori più elevati della potenza installata degli impianti di produzione dell'energia, si ottengono buoni risultati in termini di costo di produzione e tasso di copertura della domanda d'acqua. A differenza della configurazione non ottimizzata vista nel Capitolo IV, in questo caso il fabbisogno d'acqua è totalmente coperto dall'acqua prodotta dal dissalatore e stoccata nel serbatoio, quindi non è necessaria l'importazione della risorsa e questo determina una riduzione del costo medio dell'acqua. Il costo medio dell'acqua nella configurazione non ottimizzata risultava pari a 2.08 €/m³, mentre in questa configurazione ottimizzata il costo medio della risorsa risulta di 1.35 €/m³ (-0.73 €/m³). Anche per quanto riguarda il costo dell'energia elettrica, esso risulta minore di 0.09 €/kWh.

La percentuale di energia rigettata in questa configurazione ottimizzata è inferiore al 7%, valore però doppio rispetto a quello della configurazione non ottimizzata. Questa differenza è data dal fatto che nella configurazione vista nel Capitolo IV, il tasso di copertura dell'acqua era dell'89.66%, mentre nel caso ottimizzato, il tasso di copertura è del 100%, questo comporta ad una maggiore potenza installata e conseguentemente ad una frazione di energia rigettata maggiore. Per quanto riguarda i valori degli indici tecnico-economici:

- il valore del VAN è pari a 129,409,080 €;
- il valore del payback time (PB) risulta pari a 2.12 anni;
- il valore del TIR è del 26.83 %

In Figura 60 vengono riportati i grafici relativi alla potenza prodotta dal generatore diesel, al livello di energia contenuta nelle batterie e al livello dell'acqua nel serbatoio.

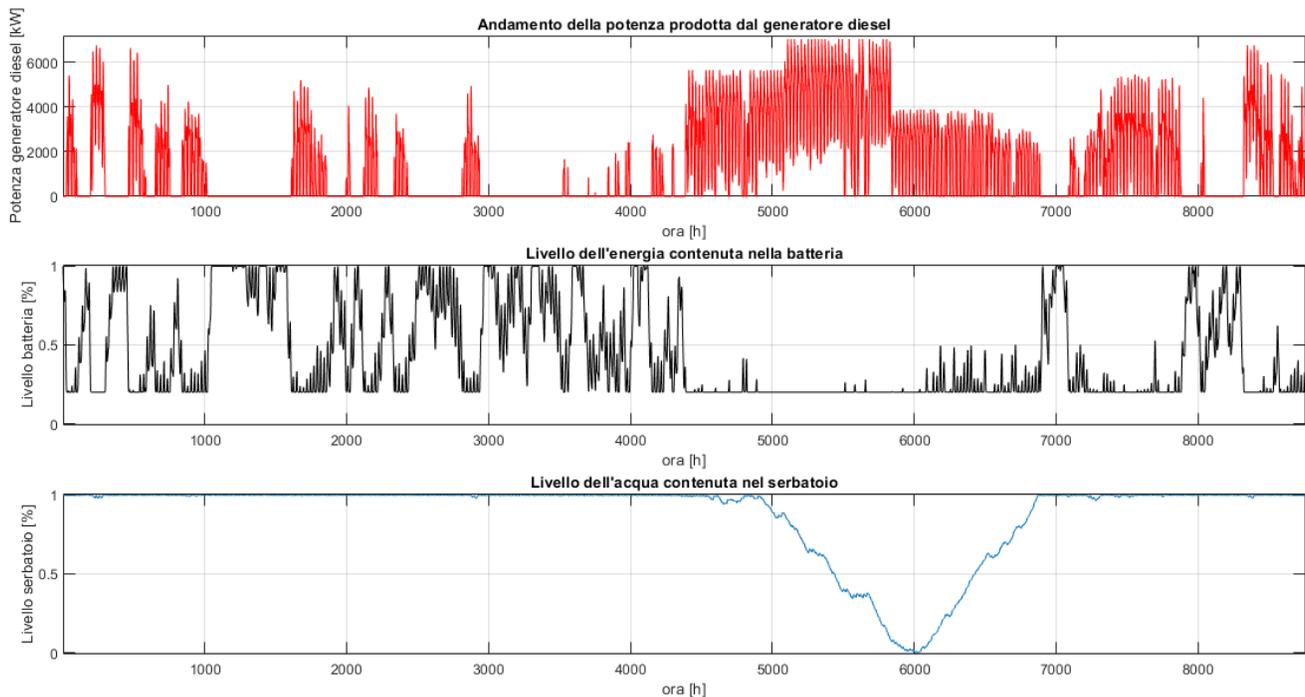


Figura 60 Grafici relativi alla potenza prodotta dal generatore diesel, al livello di energia contenuta nelle batterie e al livello dell'acqua nel serbatoio

Come si può notare dai grafici, il livello del serbatoio è al minimo intorno alle 6000 ore, dopo di che il livello dell'acqua all'interno del serbatoio inizia ad aumentare in conseguenza alla minore richiesta d'acqua dovuta al minor flusso turistico. Per quanto riguarda la batteria, essa è quasi sempre completamente scarica nei mesi estivi, mentre nel rimanente periodo dell'anno continua a caricarsi e scaricarsi.

Capitolo VII

Confronto tra l'impianto di sola dissalazione e l'impianto di dissalazione e produzione di energia elettrica

In questo capitolo viene effettuato un confronto tra la soluzione ottimale della configurazione d'impianto in cui viene solamente dissalata l'acqua (per semplicità questa configurazione verrà chiamata "configurazione I") e la configurazione ottimale d'impianto in cui viene dissalata l'acqua e prodotta energia elettrica (questa configurazione verrà chiamata "configurazione II").

7.1 Confronto tra le taglie delle due configurazioni

Nella Tabella 14 vengono riportate le taglie delle due diverse configurazioni d'impianto.

Parametro di progetto	Configurazione I	Configurazione II
Potenza imp. Eolico [kW]	2550	5950
Potenza imp. Fotovoltaico [kW]	2420	6143
Potenza imp. desalinizzazione [kW]	1100	1644
Volume del serbatoio [m ³]	76313	97237
Capacità batterie [kWh]	50000	50005
Potenza nominale generatore diesel [kW]	-	7041.4

Tabella 14 Confronto tra le due configurazioni

Nella configurazione II la potenza installata degli impianti di produzione (eolico e fotovoltaico) è molto maggiore rispetto alla configurazione I e questo è dovuto al fatto di avere aggiunto il carico elettrico. Complessivamente la potenza installata nella configurazione I ammonta a 4970 kW, mentre nella configurazione II la potenza installata dei due impianti di generazione è pari a 12093 kW. La potenza nominale dell'impianto di desalinizzazione passa dai 1100 kW della configurazione I ai 1644 kW della configurazione II. Per quanto riguarda il volume del serbatoio nella configurazione I esso è pari a 76313 m³, nella configurazione II aumenta fino a 97237 m³ permettendo in questo ultimo caso di soddisfare completamente il fabbisogno d'acqua senza dover importare la risorsa. Infine la capacità della batteria nelle due configurazioni risulta pressoché uguale e pari a 50000 kWh.

N.B. La potenza nominale del generatore diesel è presente solamente nella configurazione II e risulta pari a 7041.4 kW.

7.2 Risultati tecnici ed economici delle due configurazioni

In Tabella 15 vengono riportati i risultati tecnici ed economici delle due configurazioni d'impianto.

Parametro	Configurazione I	Configurazione II
Tasso di copertura della domanda idrica [%]	94	100
Tasso di copertura del carico elettrico [%]	-	100
Percentuale di energia rigettata [%]	51	7
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore [%]	11.84	0.36
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del carico elettrico [%]	-	8.37
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico [%]	14.16	23.32
Fattore di capacità dell'impianto eolico [%]	16.61	35.09
Fattore di capacità del generatore diesel [%]	-	19.14
N° di ore di funzionamento del generatore diesel	-	3888
N° di accensioni del generatore diesel	-	170
Quantità di acqua prodotta [m ³ /anno]	1766961	1868545
Costo d'investimento [€]	31,594,642	54,528,759
Costi operativi e di manutenzione [€/anno]	1,192,818	10,899,983
Costo annuale dell'impianto [€/anno]	3,728,054	15,275,512
Costo di produzione dell'acqua [€/m ³]	2.11	1.35
Costo medio dell'acqua [€/m ³]	2.28	1.35
Costo di produzione dell'energia [€/kWh]	-	0.37
VAN [€]	65,489,196	129,409,080
TIR [%]	24.34	26.83

Tabella 15 Confronto risultati delle due configurazioni

Nella configurazione II il tasso di copertura della domanda idrica è del 100%, mentre nella configurazione I è del 94%. La percentuale dell'energia rigettata nella configurazione I è del 51%, mentre nella configurazione II la percentuale scende al 7%, questo sta ad indicare che con l'aggiunta del carico elettrico si sfrutta meglio l'energia prodotta. I fattori di capacità dell'impianto fotovoltaico e di quello eolico nella configurazione II risultano maggiori rispetto all'altra configurazione perché, essendo diminuita la percentuale di energia rigettata, la percentuale di energia prodotta dagli impianti di generazione (eolico, fotovoltaico) che viene effettivamente utilizzata è maggiore. Per quanto riguarda il tasso di contribuzione della batteria alla fornitura dell'energia elettrica per il dissalatore, nella configurazione II esso risulta quasi nullo, in quanto il tasso di contribuzione della batteria è prevalentemente destinato a coprire in parte il carico elettrico. Il costo d'investimento della configurazione II è decisamente più elevato di quello della configurazione I, circa 1.7 volte maggiore, tuttavia è da tenere in considerazione che tale impianto fornisce sia acqua dissalata sia energia elettrica. Conseguentemente anche i costi operativi e di manutenzione sono più elevati come pure il costo dell'impianto sostenuto annualmente, che è circa quattro volte quello della configurazione I.

In Figura 61 viene rappresentato un grafico che pone a confronto i costi d'investimento per ciascun componente delle due configurazioni d'impianto.

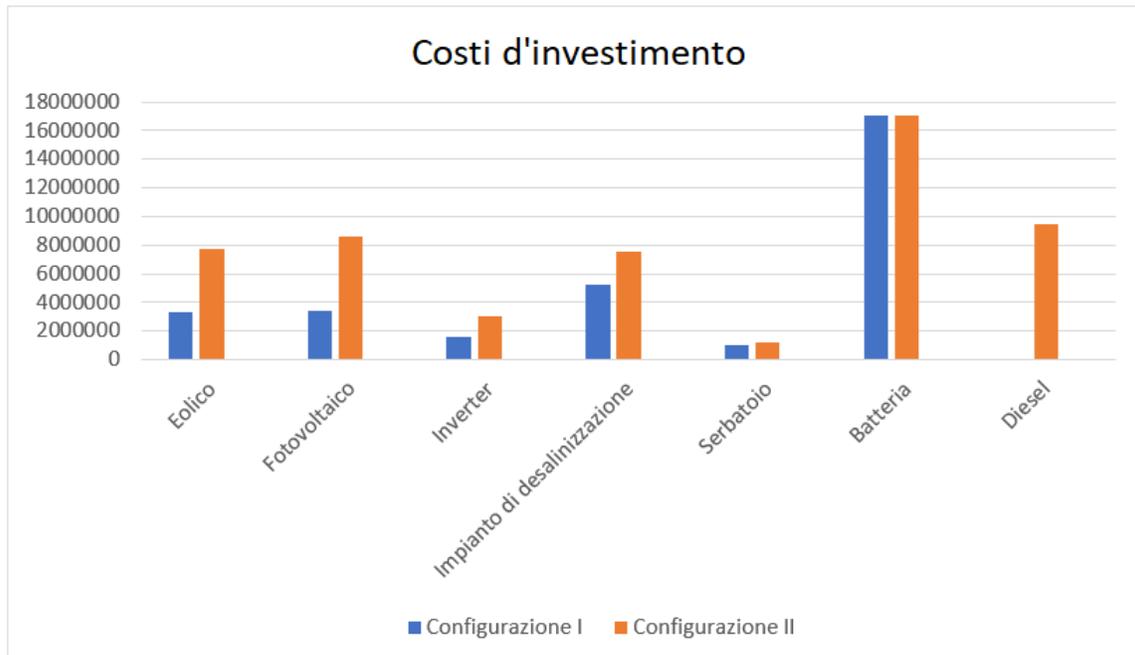


Figura 61 Confronto tra i costi d'investimento

Nel grafico è facile notare come il costo dell'investimento della configurazione I rispetto alla configurazione II, è influenzato in maniera preponderante dalla presenza o meno del generatore diesel. Con la configurazione II si ottiene un costo medio dell'acqua minore (la differenza del costo medio dell'acqua tra le due configurazioni è di 0.93 €/m³), grazie anche al fatto che nella configurazione II il fabbisogno idrico è soddisfatto interamente senza il bisogno di importare la risorsa. Visto che i costi della configurazione II sono più elevati, il valore attuale netto della configurazione II risulta il doppio del valore ottenuto con la configurazione I, mentre il TIR è superiore di 2.49 punti percentuali. In conclusione la configurazione II risulta essere migliore sia dal punto di vista economico, sia dal punto di vista tecnico, perché l'aggiunta del carico elettrico e del generatore diesel permette di utilizzare in maniera migliore l'impianto, evitando un sovradimensionamento eccessivo degli impianti a fonte rinnovabile cosa che permette di ridurre la percentuale di energia rigettata.

Capitolo VIII

Confronto tra modelli situati in luoghi diversi

In questo capitolo viene confrontato il caso studio di questa tesi con un altro modello costituito dagli stessi componenti e operante nello stesso modo ma situato in un luogo differente per valutare quali siano i componenti ed i fattori che più influenzano i risultati. Il nuovo modello considerato per il confronto è una simulazione su una possibile installazione di un impianto di desalinizzazione da poter collocare a Milos, un'isola greca nel mar Egeo.

8.1 Confronto tra le taglie dei due modelli

Nella Tabella 16 vengono riportate le taglie dei vari componenti, considerando la configurazione per la sola produzione d'acqua in quanto avente la stessa strategia operativa in entrambi i modelli che si vogliono confrontare.

N.B. Non viene considerata la configurazione d'impianto per la fornitura dell'acqua desalinizzata e dell'energia elettrica perché, i risultati dell'ottimizzazione ottenuti in questa tesi sono stati ricavati facendo lavorare il generatore diesel a carico variabile per riuscire a coprire l'intero fabbisogno elettrico, mentre nella configurazione d'impianto che si vuole confrontare, i risultati dell'ottimizzazione vengono ottenuti facendo lavorare il generatore diesel a carico costante. Con questa diversa strategia operativa del generatore diesel i risultati sono difficilmente confrontabili.

Parametro di progetto	Impianto Milos	Impianto Sal
Potenza imp. Eolico [kW]	800	2550
Potenza imp. Fotovoltaico [kW]	758	2420
Potenza imp. desalinizzazione [kW]	636	1100
Volume del serbatoio [m ³]	19400	76313
Capacità batterie [kWh]	5000	50000

Tabella 16 Confronto taglie dei due modelli

La potenza totale installata dagli impianti di generazione (eolico, fotovoltaico) nell'isola di Milos risulta pari a 1558 kW, mentre quella installata nell'isola di Sal risulta pari a 4970 kW. Rispetto all'impianto di desalinizzazione di Milos la rispettiva potenza installata dalle fonti rinnovabili è 2,45 volte maggiore, mentre confrontando la potenza installata da rinnovabile di Sal con il rispettivo impianto di desalinizzazione essa risulta 4,51 volte maggiore. Il volume del serbatoio di Sal a confronto di quello di Milos è quasi quattro volte maggiore. Infine paragonando la capacità della batteria dei due impianti, quella di Sal risulta essere dieci volte maggiore rispetto all'altra isola.

8.2 Risultati tecnici ed economici dei due modelli

In Tabella 17 vengono riportati i risultati tecnici ed economici dei due modelli.

Parametro	Impianto Milos	Impianto Sal
Tasso di copertura della domanda idrica [%]	94	94
Percentuale di energia rigettata [%]	53.9	51.16
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore [%]	6.9	11.84
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico [%]	13.6	14.16
Fattore di capacità dell'impianto eolico [%]	14.8	16.61
Quantità di acqua prodotta [m ³ /anno]	535,356	1,766,961
Costo d'investimento [€]	7,980,663	31,594,642
Costi operativi e di manutenzione [€/anno]	363,259	1,192,818
Costo annuale dell'impianto [€/anno]	1,003,648	3,728,054
Costo di produzione dell'acqua [€/m ³]	1.88	2.11
Costo medio dell'acqua [€/m ³]	2.07	2.28
VAN [€]	21,712,217	65,489,196
TIR [%]	29.69	24,34

Tabella 17 Confronto risultati tecnici ed economici dei due modelli

Dalla tabella si nota come il tasso di copertura della domanda idrica sia lo stesso tra le due isole (in entrambi i modelli i vincoli non lineari imposti per il tasso di soddisfazione della domanda idrica sono compresi tra il 94% e il 100%, l'ottimizzazione ha scelto il valore del vincolo più basso permesso) ed inoltre, anche l'energia rigettata ed i fattori di capacità degli impianti di generazione (eolio, fotovoltaico) hanno dei valori percentuali simili. Per quanto riguarda il tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore, esso è pari al 6.9% nell'isola di Milos mentre nell'isola di Sal risulta pari al 11.84%. Questa differenza di risultato è dovuta al fatto che, se la potenza prodotta dalle fonti rinnovabili è bassa (o nulla), la potenza che la batteria deve cedere all'impianto di desalinizzazione sarà maggiore e di conseguenza il tasso di contribuzione della batteria aumenterà. Confrontando la potenza fornita dall'impianto eolico, fotovoltaico e dalla batteria all'impianto di desalinizzazione nei due modelli è facile notare che nel modello di Sal (Figura 62), rispetto al modello di Milos (Figura 63), la batteria cede molta più potenza al dissalatore a causa della bassa potenza fornita dall'impianto eolico, questo determina un tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore maggiore.

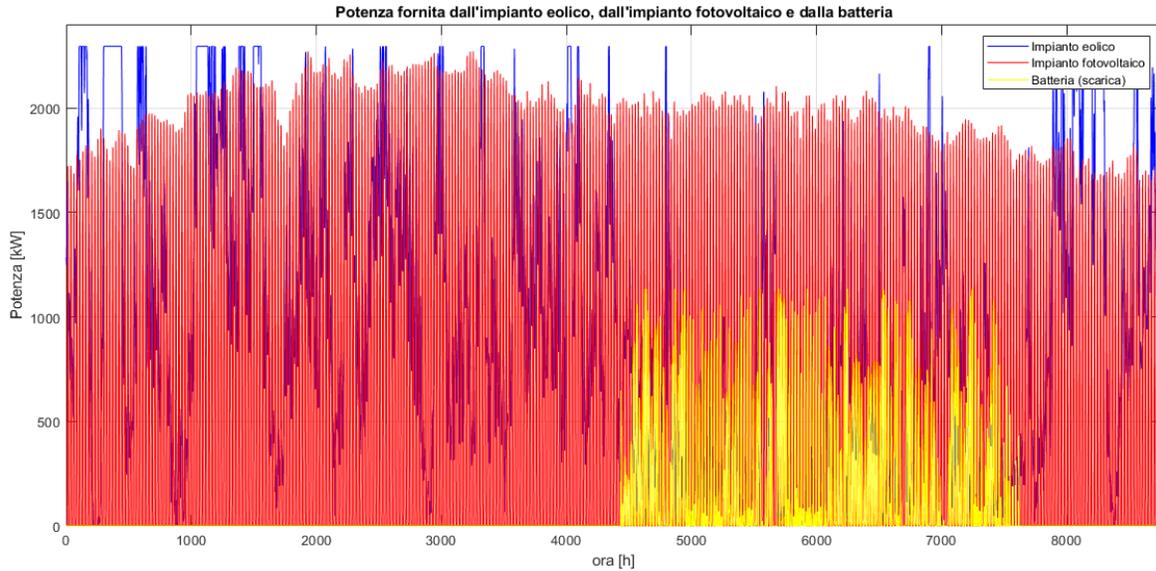


Figura 62 Potenza fornita dall'impianto eolico, fotovoltaico e dalla batteria nell'isola di Sal

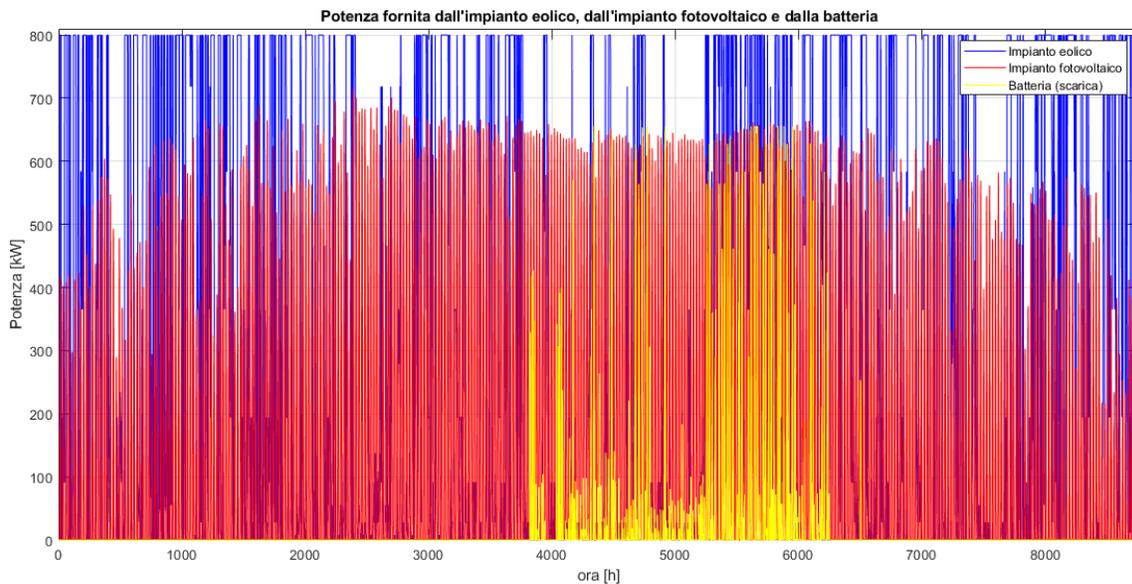


Figura 63 Potenza fornita dall'impianto eolico, fotovoltaico e dalla batteria nell'isola di Milos

Il valore attuale netto dell'investimento di Sal è circa tre volte superiore a quello dell'isola di Milos. Il tasso interno di rendimento dell'investimento a Milos è pari al 29.69%, mentre quello di Sal risulta pari al 24.34%. Queste differenze di risultati dipendono dal costo d'investimento totale, dai costi operativi e di manutenzione del modello considerato.

In Figura 64 viene rappresentato un grafico che pone a confronto i costi d'investimento per ciascun componente dei due modelli.

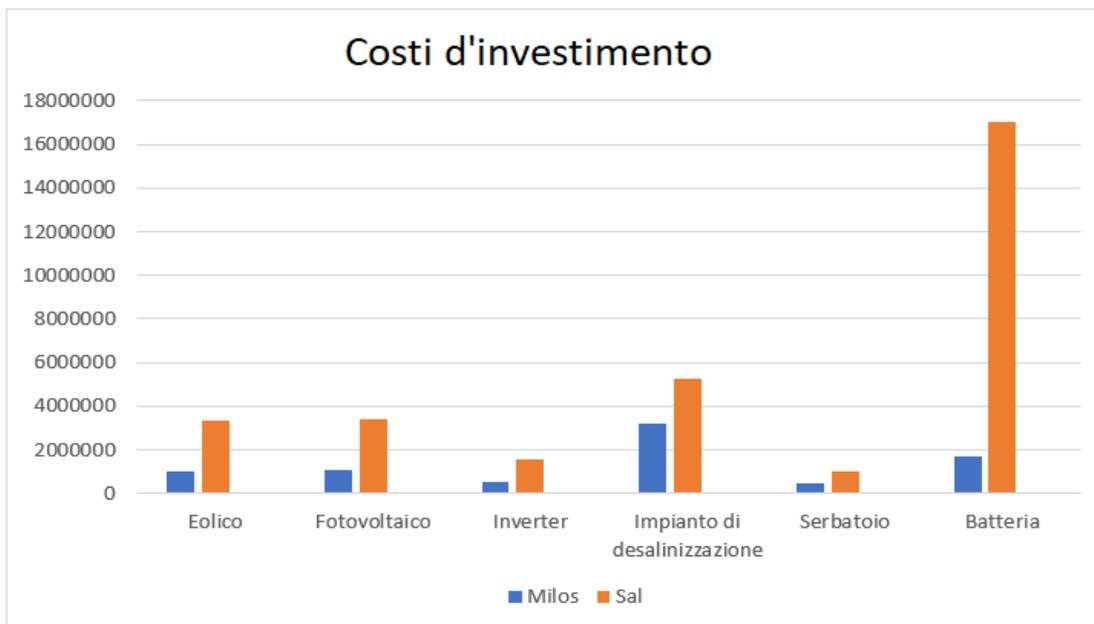


Figura 64 Confronto tra i costi d'investimento

Attraverso il grafico si può vedere come i vari costi d'investimento dei diversi componenti nell'isola di Sal rispetto all'isola di Milos siano sempre maggiori a causa delle differenti taglie. In particolar modo la differenza maggiore che si riscontra confrontando lo stesso componente dei due modelli riguarda la batteria d'accumulo che nel caso di Sal è dieci volte maggiore rispetto all'altra isola (le stesse valutazioni si possono fare confrontando tra di loro i costi operativi e di manutenzione dei diversi componenti dei due modelli). In base a queste valutazioni si può affermare che il componente che più influenza i risultati tra i due modelli è la batteria d'accumulo.

Per quanto riguarda il costo di produzione dell'acqua desalinizzata, nell'isola di Milos esso risulta inferiore rispetto all'altra isola. In entrambi i casi il fattore che tiene conto del deprezzamento annuale del costo d'investimento, il tasso di sconto dell'investimento ed il numero di anni di vita dei due impianti sono gli stessi. Il costo di produzione dell'acqua desalinizzata quindi, dipende dai vari costi operativi, di manutenzione, d'investimento, dalla frazione di energia rinnovabile prodotta che viene assorbita dall'impianto di desalinizzazione e dalla quantità d'acqua prodotta. In base a queste valutazioni il costo dell'acqua desalinizzata risulta pari a 1.88 €/m³ nell'isola di Milos, mentre nell'isola di Sal il costo è di 2.11 €/m³. Per il raggiungimento della totale richiesta d'acqua, viene considerato un costo dell'importazione della risorsa in entrambi i casi pari a 5 €/m³. Nei due modelli il tasso di copertura della domanda idrica è uguale e pari al 94%, quindi il costo medio dell'acqua nell'isola di Milos è di 2.07 €/m³, mentre nell'isola di Sal il costo medio è pari a 2.28 €/m³ (per una differenza di 0.21 €/m³). Il numero di residenti nell'isola di Sal è sette volte maggiore rispetto al numero considerato nell'isola di Milos (5000 residenti a Milos, 35000 residenti a Sal), ed anche per quanto riguarda il flusso turistico, nell'isola di Sal esso risulta molto maggiore, questa differenza di popolazione determina un maggior fabbisogno idrico e di conseguenza una maggiore produzione di

acqua desalinizzata nell'isola di Sal (nell'isola di Milos la quantità d'acqua desalinizzata prodotta in un anno è tre volte minore rispetto all'isola di Sal, Figura 65).

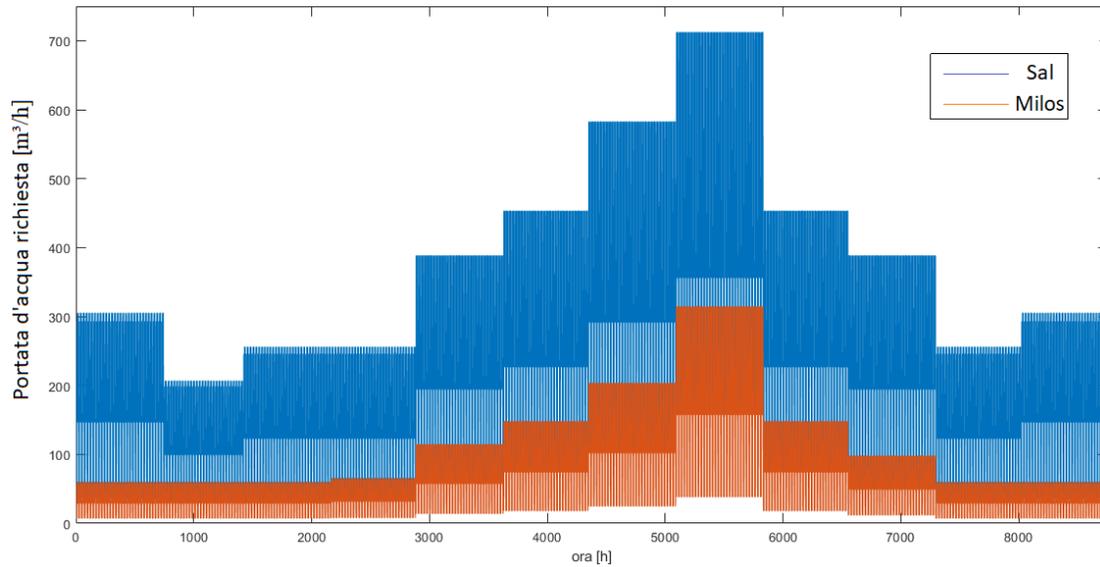


Figura 65 Andamenti della domanda d'acqua dei due modelli

In conclusione, con l'aumentare della popolazione aumenta la domanda idrica con la conseguente maggiorazione:

- della potenza da installare per far funzionare l'impianto di desalinizzazione, che determina un aumento delle taglie dei vari componenti e di conseguenza un incremento dei costi d'investimento, operativi e di manutenzione

Queste valutazioni dimostrano che al variare del luogo, il fattore che più influenza il dimensionamento dell'intero impianto è il numero di individui (residenti e turisti) presenti nell'arco dell'anno.

Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è stato quello di realizzare un modello di impianto ad osmosi inversa alimentato da fonti di energia rinnovabile in grado di soddisfare il fabbisogno idrico ed elettrico degli abitanti presenti in un'isola. Per la realizzazione del modello è stato utilizzato il software di calcolo Matlab-Simulink, con il quale è stata eseguita una simulazione per poter effettuare una valutazione tecnica ed economica. Successivamente è stata eseguita un'ottimizzazione dell'impianto, con l'obiettivo di minimizzare il costo di produzione dell'acqua e massimizzare il valore attuale netto dell'investimento. Analizzando i risultati ottenuti, si evince che i costi di produzione dell'acqua desalinizzata sono minori rispetto a quelli sostenuti per l'importazione della risorsa. Inoltre, grazie alla contemporanea produzione di energia elettrica, viene sfruttata in modo migliore l'energia prodotta dalle risorse rinnovabili che altrimenti verrebbe rigettata. Infine confrontando il modello con un altro caso studio si è visto che, il fattore che influenza maggiormente i risultati ottenuti è il numero di individui presenti durante l'anno.

Bibliografia

- [1] <https://www.cosediscienza.it/acqua>
- [2] www.qualenergia.it/articoli/20180226-dissalare-acqua-marina-in-modo-sostenibile-tecnologie-e-fonti-energetiche
- [3] <https://www.cittalia.it/index.php/asilo-e-rifugiati/item/2088-1-acqua-come-risorsa-fondamentale-per-la-vita#targetText=L'acqua%20come%20risorsa%20fondamentale,troppo%20salata%20per%20essere%20usata>.
- [4] <https://www.ideegreen.it/impronta-idrica-65713.html>
- [5] <https://ilsitodellerisposte.xyz/2018/03/04/cose-limpronta-idrica/>
- [6] <http://www.expo2015.org/magazine/it/sostenibilita/1-impronta-idrica-dalla-produzione-al-consumo.html>
- [7] <https://www.pandslegal.it/sostenibilita/oro-blu-desalinizzazione-acqua-di-mare/>
- [8] <https://core.ac.uk/download/pdf/79623645.pdf>
- [9] Li, Z., Siddiqi, A., Anadon, L. and Narayanamurti, V. (2018). Towards sustainability in water-energy nexus: Ocean energy for seawater desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp.3833-3847.
- [10] http://tesi.cab.unipd.it/62508/1/Bertacco_Daniele_1151503.pdf
- [11] http://tesi.cab.unipd.it/45712/1/Tesi_Duci_Carlo_1041028.pdf
- [12] Al-Karaghoul, A. and Kazmerski, L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp.343-356.
- [13] https://it.wikipedia.org/wiki/Processo_a_membrana
- [14] Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T. and Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1-3), pp.1-76
- [15] A. Valbjørn, “ERD for small SWRO plants”. *Desalination*, vol. 248, no. 1–3, pp. 636–641, 2009
- [16] Energy Recovery Inc. Highly Efficient Energy Recovery Devices. September 2011.
- [17] J. P. MacHarg, “Retro-fitting existing SWRO systems with a new energy recovery device,” *Desalination*, vol. 153, no. 1–3, pp. 253–264, 2003

- [18] <https://www.impianto.it/elettrodialisi-rimozione-ioni-dissalazione-acque-salmastre/>
- [19] Mark Worall, Saffa Riffat Mahmoud Shatat, "Opportunities for solar water desalination worldwide: Review," *Sustainable Cities and Society*, vol. 9, pp. 67-80, 2013
- [20] http://publications.crs4.it/pubdocs/2001/LR01b/4423_0.doc
- [21] <https://www.ideegreen.it/parco-eolico-di-ariano-irpino-18884.html>
- [22] <https://www.progedil90.it/blog/pannelli-solari-fai-da-te-si-puo/>
- [23] <https://www.qualenergia.it/articoli/20180321-batterie-vs-gas-di-picco-nuove-considerazioni-dall-esempio-californiano/>
- [24] <https://solarenergy-shop.ch/it/ondulatori-carica-de-batterie-xtender/375-inverter-bidirezionale-500-watt-onda-sinusoidale-12v-a-230v-xtender-xts-900-12.html>
- [25] <https://www.shopenergia.com/Generatore-CGM-7DE-a-Diesel-7KVA-230V-Motore-Lombardini-22535847>
- [26] <https://www.green.it/la-rete-elettrica-weforum/>
- [27] <https://docplayer.net/31656531-Standard-membrane-systems.html>
- [28] https://www.mtonauticastore.it/serbatoio_acqua_potabile_in_plastica
- [29] Spyrou, I. and Anagnostopoulos, J. (2010). Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. *Desalination*, 257(1-3), pp.137-149.
- [30] Abdelshafy, A., Hassan, H. and Jurasz, J. (2018). Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach. *Energy Conversion and Management*, 173, pp.331-347.
- [31] <http://www.energyhunters.it/misurare-il-vento-le-variazioni-del-vento-con-laltezza-dal-suolo/>
- [32] Ahmad, N., Sheikh, A., Gandhidasan, P. and Elshafie, M. (2015). Modeling, simulation and performance evaluation of a community scale PVRO water desalination system operated by fixed and tracking PV panels: A case study for Dhahran city, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 75, pp.433-447.
- [33] Pohl, R., Kaltschmitt, M. and Holländer, R. (2009). Investigation of different operational strategies for the variable operation of a simple reverse osmosis unit. *Desalination*, 249(3), pp.1280-1287.
- [34] Ramli, M., Hiendro, A. and Twaha, S. (2015). Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage. *Renewable Energy*, 78, pp.398-405.
- [35] https://it.globalpetrolprices.com/diesel_prices/
- [36] <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>

- [37] https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/ak/ak_085940_kt.pdf
- [38] <https://it.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [39] <https://it.mathworks.com/products/simulink.html>
- [40] <https://docplayer.net/31656531-Standard-membrane-systems.html>
- [41] https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_1242006/html/EIA_Report/Annex%20A3.3.pdf
- [42] <https://www.exesolar.com/it/cms/mono-60-high-efficiency/17.html>
- [43] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215001656>
- [44] Macchi, E., Campanari, S. and Silva, P. (2005). *La microcogenerazione a gas naturale*. 1st ed. Milano: Polipress, pp.229-239.
- [45] https://it.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_genetico
- [46] It.mathworks.com. (2019). *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink*. [online] Available at: <https://it.mathworks.com>.

