

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**Studio di un sistema isolato per la dissalazione e la
generazione di energia elettrica alimentato da fonti di
energia rinnovabile**

Relatore: Prof.ssa Anna Stoppato

Correlatore: Prof. Alberto Benato

Laureando: Daniele Bertacco

Matricola: 1151503

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

La dissalazione dell'acqua di mare rappresenta una possibile soluzione al crescente problema della scarsità d'acqua dolce, che attualmente interessa anche luoghi che in passato non presentavano tale problema. Di particolare interesse sono gli impianti che vengono alimentati da fonti di energia rinnovabile, tra cui i più promettenti sono gli impianti ad osmosi inversa alimentati dall'energia elettrica prodotta da impianti fotovoltaici o eolici.

L'obiettivo di questa tesi è la realizzazione del modello di un impianto di osmosi inversa alimentato dalla fonte eolica e solare, il quale produce non solo acqua dissalata, ma fornisce anche energia elettrica agli abitanti di un'isola.

Il modello dell'impianto è stato sviluppato mediante di software di calcolo Matlab-Simulink, con il quale è stato possibile eseguire la simulazione dell'impianto per un intero anno ed effettuare una valutazione tecnica ed economica. È poi stata poi effettuata un'ottimizzazione delle taglie dei componenti dell'impianto, utilizzando l'algoritmo genetico, ponendo come obiettivo la minimizzazione del costo di dissalazione dell'acqua o la massimizzazione del VAN (valore attuale netto) dell'investimento.

I risultati ottenuti dimostrano che l'installazione di un impianto di dissalazione su un'isola permette di produrre dell'acqua dolce a costi più bassi rispetto a quelli sostenuti per l'importazione della risorsa mediante serbatoi. Inoltre la contemporanea fornitura di energia elettrica permette di ridurre la percentuale di energia che viene rigettata, sfruttando così in maniera migliore l'energia rinnovabile prodotta.

Indice

Introduzione	1
Capitolo I - La risorsa idrica e la desalinizzazione	5
1.1 L'acqua come risorsa	5
1.1.1 Consumi e impronta idrica	5
1.1.2 Scenario futuro	7
1.1.3 Effetto del clima	8
1.2 La desalinizzazione	9
1.2.1 Cenni storici e situazione attuale.....	9
1.2.2 Caratteristiche dell'acqua di mare	10
1.2.3 Principio fisico della desalinizzazione	11
1.3 Impianti evaporativi	12
1.3.1 Flash multistadio (MSF).....	13
1.3.2 Distillazione multi-effetto (MED).....	15
1.3.3 Compressione meccanica e termica di vapore (MVC/TVC).....	16
1.4 Impianti a membrana	17
1.4.1 Osmosi inversa (RO).....	17
1.4.1.1 Pretrattamento	19
1.4.1.2 Pompa ad alta pressione.....	21
1.4.1.3 Membrana	21
1.4.1.4 Configurazione del campo di membrane	23
1.4.1.5 Sistemi di recupero dell'energia	25
1.4.1.6 Post-trattamento	27
1.4.1.7 Capacità e consumo di energia.....	28
1.4.2 Elettrodialisi (ED)	29
1.4.3 Osmosi diretta (FO).....	30
1.5 Confronto tra le diverse tecnologie	31
1.6 Impianti alimentati da energie rinnovabili	32

1.6.1	Solar stills	33
1.6.2	Solar ponds	34
1.6.3	Umidificazione solare multi-effetto.....	35
1.6.4	Distillazione solare a membrana.....	36
1.6.5	Impianti tradizionali alimentati da una fonte di energia rinnovabile	37
Capitolo II - Realizzazione del modello di un impianto di desalinizzazione		41
2.1	Individuazione del contesto.....	41
2.2	Configurazione dell'impianto.....	42
2.3	Equazioni del modello.....	43
2.3.1	Domanda idrica	43
2.3.2	Fabbisogno elettrico	45
2.3.3	Impianto fotovoltaico	46
2.3.4	Impianto eolico.....	48
2.3.5	Batteria	50
2.3.6	Generatore diesel.....	51
2.3.7	Impianto di desalinizzazione	51
2.3.8	Serbatoio di accumulo	55
2.3.9	Strategia operativa dell'impianto.....	56
2.4	Dati climatici	62
2.5	Software utilizzato ed implementazione del modello.....	62
2.5.1	Modello Simulink.....	63
2.5.2	Codice Matlab	65
2.6	Indici tecnici.....	66
2.7	Indici economici.....	68
Capitolo III - Configurazioni d'impianto.....		73
3.1	Configurazione iniziale	73
3.1.1	Impianto di desalinizzazione	74
3.1.2	Serbatoio di stoccaggio.....	74
3.1.3	Impianto fotovoltaico ed impianto eolico.....	74
3.1.4	Batteria di accumulo.....	75

3.1.5	Risultati modello 1	76
3.1.6	Risultati modello 2	80
3.1.7	Osservazioni	83
3.2	Configurazione con carico elettrico e generatore diesel.....	87
3.2.1	Dimensionamento dei componenti d'impianto	87
3.2.2	Risultati	88
3.3	Configurazione con carico elettrico e generatore diesel che carica la batteria.....	91
3.3.1	Dimensionamento dei componenti d'impianto	91
3.3.2	Risultati	92
Capitolo IV - Ottimizzazione della configurazione d'impianto di sola desalinizzazione		95
4.1	Algoritmo genetico	95
4.1.1	L'algoritmo genetico disponibile in Matlab	96
4.2	Ottimizzazione dell'impianto di desalinizzazione	97
4.2.1	Funzione di fitness	98
4.2.2	Limiti delle variabili di ottimizzazione	99
4.2.3	Vincoli non lineari.....	100
4.2.4	Parametri prestazionali dell'algoritmo	101
4.3	Risultati dell'ottimizzazione	101
4.4	Analisi di sensibilità.....	106
4.4.1	Test n°1	106
4.4.2	Test n°2	108
4.4.3	Test n°3	110
4.4.4	Test n°4	112
4.4.5	Test n°5	113
4.4.6	Test n°6	115
4.4.7	Test n°7	117
4.4.8	Test n°8	118
4.4.9	Test n°9	119
4.4.10	Test n°10	120
4.5	Confronto tecnico-economico delle soluzioni.....	122

Capitolo V - Ottimizzazione della configurazione d'impianto di desalinizzazione e fornitura di energia elettrica	127
5.1 Ottimizzazione dell'impianto	127
5.1.1 Funzione di fitness.....	128
5.1.2 Limiti delle variabili di ottimizzazione.....	129
5.1.3 Vincoli non lineari.....	130
5.1.4 Parametri prestazionali dell'algoritmo	131
5.1.5 Indici tecnico-economici	131
5.2 Risultati dell'ottimizzazione	131
5.3 Analisi di sensibilità	135
5.3.1 Test n°1	136
5.3.2 Test n°2	138
5.3.3 Test n°3	140
5.3.4 Test n°4	142
5.3.5 Test n°5	145
5.3.6 Test n°6	147
5.3.7 Test n°7	148
5.3.8 Test n°8	151
5.3.9 Test n°9	153
5.4 Confronto tecnico-economico delle soluzioni.....	156
5.5 Confronto con la configurazione d'impianto di sola dissalazione.....	158
Capitolo VI - Prove sul modello d'impianto	163
6.1 Modifica della tolleranza di ottimizzazione	163
6.2 Modifica della popolazione e delle generazioni	166
6.3 Modifica delle curve del carico elettrico e della richiesta di acqua.....	169
6.3.1 Prima ottimizzazione	170
6.3.2 Seconda ottimizzazione	172
6.3.3 Terza ottimizzazione	174
6.3.4 Quarta ottimizzazione.....	175
6.4 Nuovo caso di studio	177

Conclusioni	185
Appendice	189
Bibliografia	191

Introduzione

L'acqua è una risorsa fondamentale per la vita di tutti gli esseri viventi. Essa non solo viene utilizzata per soddisfare i fabbisogni primari dell'uomo, ma viene anche impiegata in agricoltura, per irrigare le colture, nel settore industriale ed energetico, come fluido operativo o di raffreddamento.

L'acqua è anche una delle risorse più abbondanti sulla Terra, infatti ricopre circa tre quarti della superficie terrestre, tuttavia solamente il 3% è acqua dolce e di questa parte solamente il 30% è allo stato liquido. Dunque, nonostante l'abbondanza di tale risorsa, solamente una piccola parte è direttamente fruibile così come si trova in natura.

Attualmente a causa della crescita della popolazione mondiale e dell'industrializzazione la domanda idrica è in costante aumento, cosa che determina un sempre maggiore sfruttamento delle riserve d'acqua dolce esistenti, alle quali spesso non viene dato il tempo di rigenerarsi. D'altra parte, i cambiamenti climatici come l'aumento della temperatura media globale, dovuto all'effetto serra antropico conseguenza principale dell'utilizzo dei combustibili fossili, determinano una crescente scarsità d'acqua dolce. Pertanto in futuro gli eventi di siccità saranno sempre più frequenti e diffusi e riguarderanno anche territori che un tempo non soffrivano di tale problema.

Dunque, la desalinizzazione dell'acqua di mare sembra essere una possibile soluzione al problema della crescente scarsità d'acqua dolce, in quanto l'acqua salata è molto più abbondante.

In questa tesi si è voluto studiare tale tecnologia ed analizzare le varie tipologie d'impianto esistenti, soffermandosi sull'eventualità dell'utilizzo delle fonti di energia rinnovabile per la dissalazione. È stato quindi sviluppato un sistema per la dissalazione dell'acqua di mare mediante un impianto ad osmosi inversa, alimentato dall'energia elettrica prodotta da turbine eoliche e moduli fotovoltaici, avente un sistema di accumulo dell'energia di tipo elettrolitico. Inoltre è stato deciso che tale sistema debba soddisfare il fabbisogno di energia elettrica, impiegando anche un generatore diesel ausiliario.

Tale impianto è d'interesse per tutte quelle zone isolate che presentano scarse riserve d'acqua dolce, ma, essendo vicino al mare, presentano un'elevata disponibilità d'acqua salata e presentano inoltre una grande disponibilità di fonti di energia rinnovabile, come l'energia eolica e solare. In queste zone l'approvvigionamento dell'acqua mediante l'importazione della risorsa è molto costoso e non c'è la possibilità di connettersi alla rete elettrica nazionale, perciò la dissalazione dell'acqua di mare e la produzione di energia elettrica mediante delle fonti di energia rinnovabile risulta essere una tecnologia interessante dal punto di vista economico ed ambientale.

Come luogo di installazione dell'impianto è stata scelta l'isola di Milos in Grecia, isola turistica del Mediterraneo di media grandezza, che necessita di un sistema per l'approvvigionamento d'acqua dolce più economico rispetto all'importazione dell'acqua all'interno di serbatoi. È stata scelta l'osmosi inversa come tecnologia di dissalazione, perché adatta alle taglie non troppo grandi e soprattutto perché si adatta bene all'accoppiamento con le fonti di energia rinnovabile.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di dimensionare l'impianto, individuando la configurazione ottimale dal punto di vista tecnico-economico.

Nel primo capitolo viene presentato il problema della scarsità d'acqua e viene illustrato lo stato dell'arte della dissalazione, descrivendo sia gli impianti evaporativi sia quelli a membrana esistenti ed in fase di studio, in relazione anche all'impiego di risorse di energia rinnovabile.

Nel secondo capitolo viene riportata la modellizzazione analitica dell'impianto oggetto di studio di questa tesi, effettuata mediante il software Matlab-Simulink, che permette di simulare il funzionamento dell'impianto durante un intero anno. Vengono anche espresse le funzioni di costo, utilizzate per il calcolo degli indici tecnico-economici impiegati per analizzare i risultati ottenuti dalle simulazioni.

Nel terzo capitolo vengono esposti i risultati ottenuti con il modello dell'impianto di sola dissalazione che è stato realizzato e vengono confrontati con quelli riportati in [1], in modo tale da poter validare il modello. Vengono poi presentati i risultati delle configurazioni d'impianto in cui è stato aggiunto il carico elettrico, osservando le principali differenze ed i vantaggi dell'aggiunta di tale carico.

Nel quarto e nel quinto capitolo vengono presentate le ottimizzazioni rispettivamente dell'impianto di sola dissalazione e dell'impianto di dissalazione e generazione di energia elettrica. Pertanto viene descritta la procedura di ottimizzazione, soffermandosi sulla metodologia di calcolo seguita, che si basa sull'algoritmo genetico. Le ottimizzazioni effettuate si pongono come obiettivo l'individuazione delle taglie ottimali dei vari componenti d'impianto, che rendono minimo il costo di produzione dell'acqua dissalata (capitolo IV) o massimo il valore attuale netto dell'investimento (capitolo V). Vengono quindi esposti ed analizzati i risultati ottenuti con i processi di ottimizzazione. Infine le due configurazioni d'impianto ottimizzate vengono confrontate tra loro, evidenziando le differenze e gli aspetti positivi, sia economici sia tecnici, dell'aggiunta del carico elettrico e del generatore diesel ausiliario.

Nel sesto capitolo vengono presentati i risultati di alcune prove effettuate per testare il comportamento del modello dell'impianto realizzato con Matlab-Simulink. Nei primi test vengono variati alcuni parametri prestazionali dell'algoritmo di ottimizzazione, allo scopo di determinare l'accuratezza dei risultati in funzione dei parametri variati e del tempo necessario per eseguire l'ottimizzazione.

Successivamente vengono esposti i risultati di alcune prove di ottimizzazione eseguite cambiando le curve della richiesta d'acqua e del fabbisogno elettrico, ossia considerando dei casi di studio diversi. Viene quindi verificata la validità dei risultati ottenuti nelle nuove situazioni: questo consente di estendere l'utilizzo del modello realizzato anche ad altri casi di studio.

Capitolo I

La risorsa idrica e la desalinizzazione

In questo capitolo viene descritta la risorsa idrica, in termini di disponibilità e d'impieghi, evidenziando il problema della scarsità della stessa a causa dei crescenti consumi e dei cambiamenti climatici. La desalinizzazione dell'acqua di mare viene proposta come possibile soluzione al problema. Dunque si presenta lo stato dell'arte della dissalazione, descrivendo le tecnologie in commercio ed in fase di studio, e viene analizzata anche la possibilità dell'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di acqua dolce.

1.1 L'acqua come risorsa

L'acqua è una risorsa essenziale per la vita, necessaria a tutti gli organismi viventi. L'importanza dell'acqua come risorsa primaria per il sostentamento è rilevabile anche dal fatto che, in passato, la maggior parte delle civiltà antiche sono sorte vicino ad una risorsa d'acqua, come un fiume, un lago oppure l'oceano. L'acqua ha quindi sempre condizionato la vita dell'uomo ed ha consentito lo sviluppo della civiltà.

Ricoprendo circa tre quarti della superficie terrestre, l'acqua è una delle risorse più abbondanti sulla terra. Il bacino idrico maggiore è rappresentato dagli oceani, i quali contengono circa il 97% dell'acqua totale, ma tale acqua essendo salata non è utilizzabile direttamente per i bisogni dell'uomo e degli animali. L'acqua dolce, invece, rappresenta solamente il 3% dell'acqua totale ed è contenuta sotto forma di ghiaccio ai poli e in forma liquida nei laghi, nei fiumi e nelle falde acquifere sotto la superficie terrestre. Circa il 70% dell'acqua dolce si trova allo stato solido nella forma di ghiacciai, manto nevoso permanente e permafrost. Il 30% circa, invece, è rappresentato dalle acque sotterranee, molte delle quali sono difficili da raggiungere perché situate ad elevata profondità. Infine, solo circa lo 0.25% dell'acqua dolce totale è contenuto all'interno dei laghi e dei fiumi [2]. Ne risulta quindi che, nonostante la grande quantità di acqua a disposizione, solamente una piccola parte di essa può essere utilizzata direttamente come si trova in natura.

1.1.1 Consumi e impronta idrica

I principali campi di utilizzo dell'acqua sono il settore industriale, energetico, agricolo e domestico. Infatti, l'acqua viene utilizzata in ambito industriale per la produzione di beni materiali, in ambito energetico come fluido vettore e fluido di raffreddamento, in ambito

agricolo per l'irrigazione dei terreni ed in ambito domestico per soddisfare i bisogni primari dell'uomo.

La situazione italiana in dettaglio è la seguente [3]:

- il 48% dell'acqua dolce è destinato all'agricoltura;
- il 19% dell'acqua dolce è utilizzata nell'industria;
- il 14% dell'acqua dolce è demineralizzata ed utilizzata per la generazione dell'energia;
- il 19% dell'acqua dolce è distribuita alle famiglie come acqua potabile.

Parlando di consumi si definisce l'impronta idrica, un indicatore che misura la quantità di acqua utilizzata direttamente dalle persone (uso diretto) e per la produzione di un certo prodotto, processo o servizio (uso indiretto). È possibile utilizzare l'impronta idrica per stimare la quantità di acqua necessaria per produrre tutti i beni e servizi utilizzati da un singolo individuo, da un paese o dall'intera popolazione mondiale. L'impronta idrica è costituita da tre componenti, che insieme forniscono un quadro completo del totale consumo di acqua per fini antropici, indicando la fonte di acqua consumata ed il volume di acqua necessario per diluire gli inquinanti. Queste tre componenti sono:

- **Acqua verde:** è l'acqua proveniente dalle precipitazioni, la quale penetra nel terreno e viene dispersa per evapotraspirazione¹ o viene incorporata nelle piante. È particolarmente importante per la produzione agricola.
- **Acqua blu:** è l'acqua che proviene dalle risorse superficiali o sotterranee che viene utilizzata per l'irrigazione, incorporata in un prodotto o prelevata da un corpo idrico, la quale viene rilasciata in posti e tempi diversi da quelli naturali.
- **Acqua grigia:** è il volume di acqua necessario a diluire gli inquinanti fino a ripristinare gli standard di qualità delle acque.

Ad esempio, per la produzione di un chilogrammo di carne mediamente vengono consumati circa 15000 litri di acqua: 93% acqua verde, 4% acqua blu, 3% acqua grigia. L'impronta idrica globale nel periodo tra il 1996 e il 2005 è stata di 9087 miliardi di metri cubi all'anno (74% acqua verde, 11% acqua blu, 15% acqua grigia), con una contribuzione da parte dell'agricoltura del 92% [4].

Di seguito viene riportata una mappa dell'impronta idrica totale per il periodo 1996-2005: i paesi con un'impronta idrica maggiore sono quelli industrializzati, mentre i paesi come quelli dell'Africa subsahariana, che presentano limitate riserve d'acqua, hanno invece un'impronta idrica minore.

¹ L'evapotraspirazione è il fenomeno secondo cui l'acqua passa naturalmente dal terreno in atmosfera sotto forma di vapore acqueo.

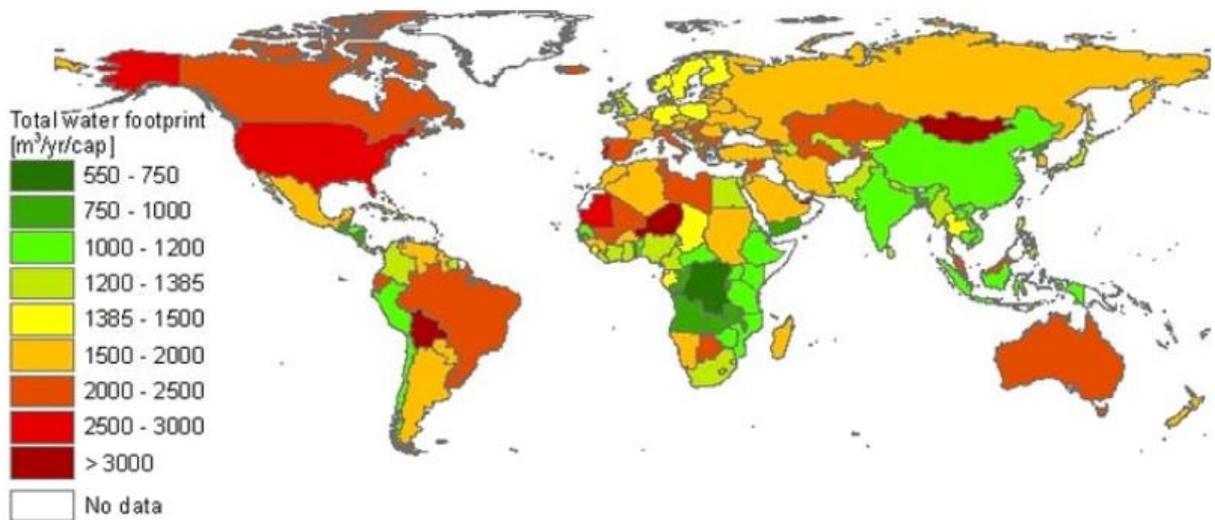


Figura 1.1. Mappa dell'impronta idrica totale per ogni paese [5]

Un altro fatto importante da sottolineare è la non uniforme distribuzione della risorsa idrica: ci sono paesi in cui le riserve di acqua dolce sono abbondanti, mentre in altri sono molto scarse. Infatti si stima che solamente l'11% della popolazione mondiale consumi circa l'88% dell'acqua dolce globalmente disponibile [3]. La disponibilità di acqua ha come conseguenza anche un maggiore sviluppo economico; non è un caso che i paesi in cui la risorsa è abbondante siano anche quelli con una maggiore ricchezza.

1.1.2 Scenario futuro

La crescita della popolazione mondiale e del settore industriale, avvenuti negli ultimi decenni, ha determinato un forte aumento della richiesta di acqua dolce in campo industriale, domestico ed agricolo. Tale andamento è destinato a crescere: infatti secondo l'*OECD Environmental Outlook to 2050* [6] si stima che tra il 2000 e il 2050 la richiesta totale di acqua aumenterà del 55%. In figura 1.2 viene riportata la ripartizione tra i vari settori della proiezione al 2050 della domanda idrica globale: si può osservare che i settori principalmente interessati dall'aumento dei consumi sono il settore industriale, energetico e domestico.

L'aumento della domanda di acqua determina perciò un maggiore sfruttamento delle risorse d'acqua dolce, che molto spesso risulta essere eccessivo. Un esempio è dato dalle falde acquifere che, essendo una delle più importanti riserve di acqua potabile, vengono ampiamente sfruttate, talvolta anche eccessivamente. Infatti tra il 1960 e il 2000 il tasso di sfruttamento dell'acqua sotterranea è più che raddoppiato, raggiungendo più di 280 km³ per anno. Un adeguato utilizzo della risorsa richiederebbe un certo equilibrio tra il tasso di estrazione e quello di riempimento dell'acquifero, in modo tale che la falda, rigenerandosi attraverso le precipitazioni, possa assicurare un rifornimento continuo di

acqua. Spesso però il tasso di estrazione è maggiore di quello di riempimento, cosa che porta ad un progressivo svuotamento della falda. Ciò ha degli effetti negativi sull'ambiente: infatti l'eccessivo sfruttamento determina il fenomeno della subsidenza, ossia l'abbassamento del terreno, che riduce permanentemente la capacità di accumulo degli acquiferi. Inoltre nelle zone in cui l'acqua di falda si riversa in laghi o in altri bacini d'acqua superficiale, anche un piccolo aumento dello sfruttamento dell'acqua sotterranea riduce il flusso dei corsi d'acqua e il livello dei laghi, diminuendo quindi la quantità di acqua superficiale che può essere utilizzata.

Dunque a causa dell'aumento della domanda di acqua e del conseguente maggiore sfruttamento delle risorse idriche, il problema della scarsità d'acqua sta aumentando sempre di più e comincia ad interessare anche luoghi che un tempo non soffrivano di tale scarsità. Si stima infatti che entro il 2050, 3.9 miliardi di persone, cioè più del 40% della popolazione mondiale, rischieranno di vivere presso bacini fluviali che si trovano in condizione di forte stress idrico [6].

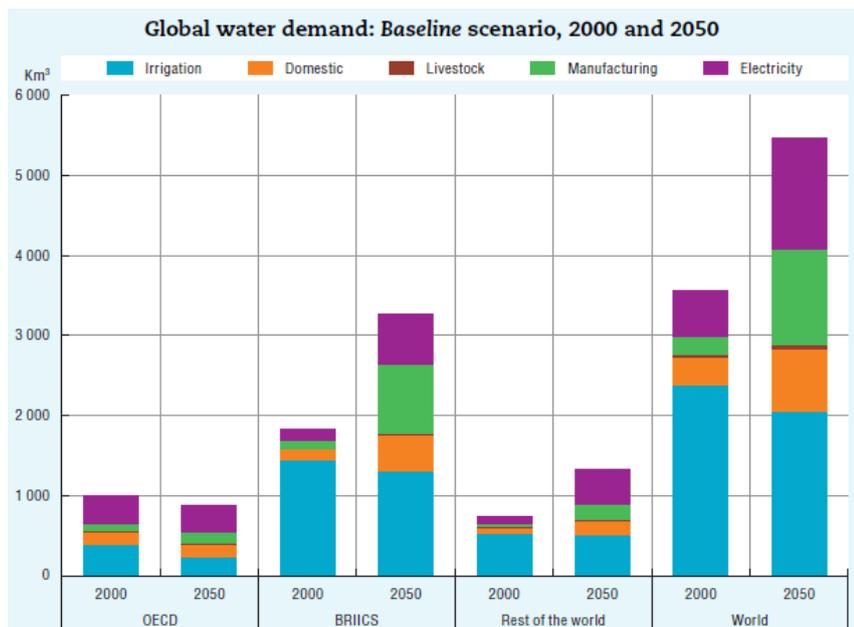


Figura 1.2. Proiezione al 2050 della domanda di acqua [6]

1.1.3 Effetto del clima

Ad intensificare il problema della scarsità d'acqua sono i cambiamenti climatici causati soprattutto dall'effetto serra antropico. Infatti a partire dall'inizio dell'industrializzazione è aumentata la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, la quale è uno dei gas serra più diffusi. La principale conseguenza è l'aumento della temperatura media globale, che determina lo scioglimento dei ghiacciai, l'innalzamento del livello dei mari, l'aumento degli eventi climatici estremi ed una maggiore variabilità delle precipitazioni.

Un'altra conseguenza dell'innalzamento della temperatura media globale è l'aumento dell'evapotraspirazione, la quale determina un aumento della domanda di acqua che viene impiegata in agricoltura. Per quanto riguarda le precipitazioni, invece, si stanno osservando dei cambiamenti in termini di variabilità, quantità, intensità ed una variazione del deflusso medio anno [6].

Tutti questi fattori determinano una crescente scarsità di acqua dolce: in futuro perciò gli eventi di siccità saranno sempre più frequenti e diffusi.

Una possibile soluzione al problema è data dalla desalinizzazione dell'acqua di mare, che, essendo molto più abbondante dell'acqua dolce, può essere utilizzata per far fronte al continuo aumento della domanda idrica, soprattutto nei luoghi in cui le riserve d'acqua dolce sono limitate, ma possiedono dei bacini di acqua salata.

1.2 La desalinizzazione

La desalinizzazione è il processo mediante il quale è possibile ottenere acqua dolce dall'acqua di mare. In questo paragrafo viene presentata brevemente la storia della dissalazione, soffermandosi sulle due maggiori tecnologie in commercio, quella evaporativa e l'osmosi inversa. Inoltre viene descritto il principio fisico su cui si basa la desalinizzazione.

1.2.1 Cenni storici e situazione attuale

La desalinizzazione moderna nacque verso la fine dell'Ottocento nel Regno Unito in ambito navale. Infatti era necessario dotare le navi della Marina Britannica di una tecnologia in grado di produrre acqua potabile, allo scopo di rendere più lunghi i tempi di navigazione, prima limitati dalla necessità di rinnovare le riserve di acqua a bordo, consentendo perciò un notevole vantaggio strategico. La prima società impiegata nella costruzione di tali impianti fu la Weir Westgarth, situata a Glasgow, che costruì il primo impianto nel 1885 il quale era a singolo flash [3].

A partire dagli anni '50 la desalinizzazione iniziò a diffondersi in ambito civile, interessando specialmente i paesi esportatori di petrolio, come Kuwait ed altri paesi del Medio Oriente, la cui ricchezza era in crescita, ma che necessitavano di aumentare la disponibilità di acqua dolce.

Vista l'espansione di questo mercato, negli anni '60 altre società iniziarono ad interessarsi alla costruzione di impianti di dissalazione: la SIR in Italia, la Krupp in Germania, la Sidem in Francia, la Westinghouse negli Stati Uniti. La tecnologia che veniva impiegata era solamente evaporativa e la molteplicità dei poli tecnologici consentì un rapido sviluppo e miglioramento degli impianti.

In Italia il mercato della dissalazione dell'acqua di mare è rimasto fiorente fino alla prima metà degli anni '80, anche grazie al fatto che le centrali Enel e le grandi raffinerie erano invitate dagli enti governativi e locali a produrre autonomamente l'acqua di cui necessitavano mediante la dissalazione, in modo tale da preservare le falde per l'uso civile.

Negli anni la tecnologia evaporativa ha avuto un grande sviluppo e miglioramento, consentendo la costruzione di impianti di taglia sempre maggiore.

L'osmosi inversa, invece, è nata più tardi rispetto agli impianti evaporativi: il primo impianto sperimentale, infatti, fu costruito nel 1965 negli Stati Uniti. A causa degli elevati consumi di energia elettrica da parte di questa tipologia d'impianto, la sua diffusione inizialmente fu piuttosto lenta e limitata alla sola desalinizzazione di acqua salmastra. Con lo sviluppo di sistemi di recupero dell'energia sempre più efficienti è stato ridotto il consumo totale di energia, passando da un consumo iniziale di 12 kWh/m³ a quello attuale di circa 3 kWh/m³. La riduzione dei consumi ha diminuito i costi di produzione dell'acqua, rendendo conveniente anche il trattamento dell'acqua salata: ciò ha permesso una maggiore diffusione di tale tecnologia.

Il vantaggio degli impianti ad osmosi inversa è la semplicità impiantistica, tale da non necessitare di manodopera specializzata per l'assemblaggio. Questo rende il costo iniziale inferiore a quello degli impianti evaporativi di pari capacità, consentendo una diffusione maggiore di questa tecnologia per gli impianti di taglia più piccola.

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 [7].

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.

1.2.2 Caratteristiche dell'acqua di mare

L'acqua di mare contiene al suo interno diversi sali disciolti, la cui quantità varia a seconda del luogo, delle stagioni e di altri fattori locali.

Mediamente l'acqua di mare presenta le seguenti caratteristiche [3]:

- pH compreso tra 7.6 e 8.4;
- densità a 20°C di circa 1025 kg/m³;
- conducibilità a 20°C di circa 48000÷60000 µS/cm;
- salinità TDS² compresa tra 34000 e 45000 ppm;
- aria disciolta compresa tra 20 e 28 ppm.

Uno dei parametri più importanti per la classificazione dell'acqua è la salinità, in quanto determina la quantità di sali disciolti come il cloruro di sodio, il magnesio, i solfati di calcio e i bicarbonati. Essa è strettamente legata alla conducibilità, la quale spesso viene utilizzata come indice di salinità, in quanto è più facilmente misurabile.

L'anidride carbonica è molto solubile in acqua, però la sua presenza è piuttosto delicata, in quanto è strettamente legata all'acidità. Essa governa l'equilibrio con i bicarbonati e nel processo di osmosi inversa, potendo passare attraverso la membrana, può concentrarsi nell'acqua prodotta determinando un aumento della sua acidità.

Generalmente si usa classificare l'acqua in quattro tipologie, in funzione della salinità:

- acqua dolce: con contenuto di sali inferiore a 450 ppm;
- acqua salmastra: con contenuto di sali compreso tra 500 e 30000 ppm;
- acqua marina: con contenuto di sali compreso tra 30000 e 50000 ppm;
- salamoia: con contenuto di sali superiore a 50000 ppm.

1.2.3 Principio fisico della desalinizzazione

La desalinizzazione dell'acqua di mare è un processo che richiede un certo dispendio di energia. Infatti per passare da un sistema a più elevato contenuto di entropia, come l'acqua di mare contenente sali disciolti, ad uno a più bassa entropia, come l'acqua dolce, è necessario spendere del lavoro, che dipende unicamente dagli stati iniziale e finale. Per comprendere la termodinamica della desalinizzazione si può pensare di dissolvere nell'acqua dolce, a temperatura ambiente, una miscela di sali in modo da ottenere dell'acqua salata come l'acqua di mare, con salinità di circa 40000 ppm. Questo processo genera un aumento di temperatura della soluzione finale pari a 0.64°C, corrispondente a circa 0.75 kWh/m³ [3]:

$$\text{acqua dolce} + \text{sali} = \text{acqua di mare} + 0.75 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

Se il processo fosse reversibile, per la dissalazione dell'acqua di mare sarebbe necessario spendere la stessa quantità di energia pari al calore di dissoluzione, indipendentemente

² TDS: *total dissolved solids*, indica il contenuto di sali disciolti nell'acqua.

dalla tecnologia utilizzata. Per gli impianti evaporativi l'energia teoricamente necessaria per la dissalazione viene fornita sotto forma di gradiente ebullioscopico, per gli impianti ad osmosi inversa viene fornita sotto forma di pressione osmotica:

- il gradiente ebullioscopico è la differenza tra la temperatura di evaporazione di una soluzione contenente sali e quella del solvente puro;
- la pressione osmotica è la differenza di pressione tra una soluzione contenente sali e il solvente puro quando tra di esse viene posta una membrana semipermeabile.

Data l'irreversibilità del processo è però necessario spendere una quantità maggiore di energia, che dipende dal tipo di tecnologia utilizzata ed è dovuta all'inefficienza tecnologica e alla non idealità del processo. Infatti l'energia che è necessario spendere oltre quella teorica rappresenta l'energia richiesta per vincere le perdite di carico, per assicurare le differenze di temperatura che garantiscono lo scambio termico e per realizzare il processo con velocità industriale accettabile. Dunque l'energia che totalmente è necessario spendere per la desalinizzazione è data dalla somma dell'energia teorica e dell'energia spesa a causa della non idealità del processo [3].

Il calore di dissoluzione, che è pari al gradiente ebullioscopico e alla pressione osmotica, varia linearmente con la salinità dell'acqua di mare e varia con la temperatura. Infatti maggiore è la temperatura, maggiore è l'energia teorica necessaria per la dissalazione. Tuttavia spesso un aumento di temperatura rispetto alla temperatura ambiente risulta essere conveniente, in quanto tale aumento diminuisce le irreversibilità del processo, diminuendo quindi l'energia spesa per inefficienza tecnologica. Quindi un aumento di temperatura dell'acqua determina globalmente una diminuzione dell'energia spesa per la dissalazione.

1.3 Impianti evaporativi

Gli impianti di desalinizzazione si distinguono in due grandi categorie: gli impianti evaporativi e quelli a membrana.

Gli impianti evaporativi si basano sul passaggio di stato dell'acqua da liquido a vapore, che si ottiene fornendo all'acqua l'energia termica sufficiente a farle raggiungere la temperatura di evaporazione corrispondente alla pressione a cui si trova. Durante questo processo solamente l'acqua evapora, mentre i sali rimangono nella soluzione liquida, che presenterà quindi una maggiore salinità. Il vapore d'acqua viene poi fatto condensare su una superficie fredda e in questo modo si ottiene l'acqua dolce. Solitamente l'energia termica viene fornita nella forma di vapore prodotto da un altro impianto o da una caldaia dedicata e la temperatura massima che viene raggiunta non è molto elevata, quindi,

affinché il processo sia fattibile, i valori di pressione a cui si trova l'acqua da dissalare sono inferiori alla pressione atmosferica.

Negli impianti di tipo evaporativo l'efficienza viene misurata mediante uno dei seguenti parametri [8]:

- GOR (*gained output ratio*) che rappresenta una misura della quantità di energia consumata nel processo di desalinizzazione ed è definito come il rapporto tra la massa di acqua dolce prodotta e la massa di vapore di alimentazione utilizzato;
- PR (*performance ratio*) che è definito come la massa di acqua dolce prodotta per 2326 kJ di energia.

1.3.1 Flash multistadio (MSF)

L'impianto flash multistadio si basa sul processo di flash, il quale consiste nell'evaporazione parziale di un fluido in seguito alla sua espansione. Infatti, se un liquido ad una certa pressione si trova alla temperatura di saturazione, quando passa ad una pressione inferiore la temperatura di saturazione diminuisce ed esso evapora parzialmente: parte dell'energia interna del liquido viene utilizzata per la formazione del vapore, determinando quindi un abbassamento della temperatura.

Un impianto MSF riceve energia termica da parte di un flusso di vapore alla pressione di 1-3 bar, prodotto da un impianto esterno, che cede calore all'acqua di mare in ingresso all'impianto di desalinizzazione, la quale pertanto raggiunge la temperatura di saturazione corrispondente alla pressione a cui si trova. Il flusso di acqua di mare giunge nel primo stadio dell'impianto dopo aver subito il primo processo di flash: essendo diminuita la pressione è avvenuta l'evaporazione parziale dell'acqua. Il vapore è formato solamente da acqua, mentre il sale non evapora e rimane disciolto nella componente liquida. L'acqua evaporata passa attraverso un separatore di gocce per eliminare ogni possibile goccia di salamoia, che potrebbe essere trascinata dal flusso di vapore, e quindi condensa all'esterno dei tubi dove fluisce l'acqua salata di alimento trasferendo ad essa il calore latente. L'acqua condensata viene raccolta in una vaschetta al di sotto dei tubi. La componente liquida, che ha una concentrazione di sale maggiore, raggiunge lo stadio successivo subendo un altro processo di flash: il processo di desalinizzazione si ripete in modo uguale in ogni stadio fino all'ultimo, dove la salamoia viene infine scaricata all'esterno. In ogni stadio la pressione è inferiore rispetto a quella dello stadio precedente in modo tale da premettere l'evaporazione a flash. La condensazione del vapore permette di preriscaldare l'acqua salata in ingresso all'impianto riducendo la quantità di calore che deve essere fornita dall'esterno [8].

Un altro flusso di vapore a media pressione viene utilizzato per alimentare gli eiettori che generano il vuoto nelle differenti sezioni dell'impianto. Infine, viene utilizzata anche dell'energia elettrica per alimentare le pompe per la circolazione dell'acqua.

La temperatura massima che viene raggiunta dall'acqua di mare è di circa 90-110°C. Non si utilizzano temperature più elevate in quanto all'aumentare della temperatura diminuisce la solubilità dei sali disciolti, cosa che potrebbe causare la formazione di depositi ed incrostazioni che influenzerebbero negativamente lo scambio termico e quindi le prestazioni dell'impianto. Questo rappresenta un limite per la produttività e l'efficienza dell'impianto, che generalmente presenta un GOR compreso tra 8 e 12 kg_{distillato}/kg_{vapore}, infatti se si potessero considerare temperature più elevate il tasso di produzione e le prestazioni sarebbero maggiori.

Il numero di stadi influenza le prestazioni dell'impianto di dissalazione: infatti all'aumentare del numero di stadi il recupero di calore dal vapore condensante diventa migliore e quindi l'efficienza aumenta. Per l'individuazione del numero di stadi si tiene conto della differenza di temperatura tra la temperatura massima e la temperatura minima, cioè quella dell'acqua di mare, considerando per ogni stadio una caduta di temperatura di circa 2°C. Solitamente il numero di stadi è compreso tra 4 e 40, mentre la capacità dell'impianto va da 10000 a 35000 m³/giorno.

Il consumo di energia dell'impianto flash multistadio dipende da molti fattori come la temperatura massima della sorgente di calore, la temperatura del pozzo di calore, il numero di stadi, la salinità, la configurazione geometrica degli scambiatori. La quantità di energia totalmente consumata dall'impianto, quindi sia l'energia termica per il processo di dissalazione sia l'energia elettrica assorbita dalle pompe, viene misurata in termini di energia elettrica equivalente considerando un impianto con un'efficienza del 30%. Per questa tipologia d'impianto l'energia equivalente totale consumata è compresa tra 19.58 e 27.25 kWh/m³ [8].

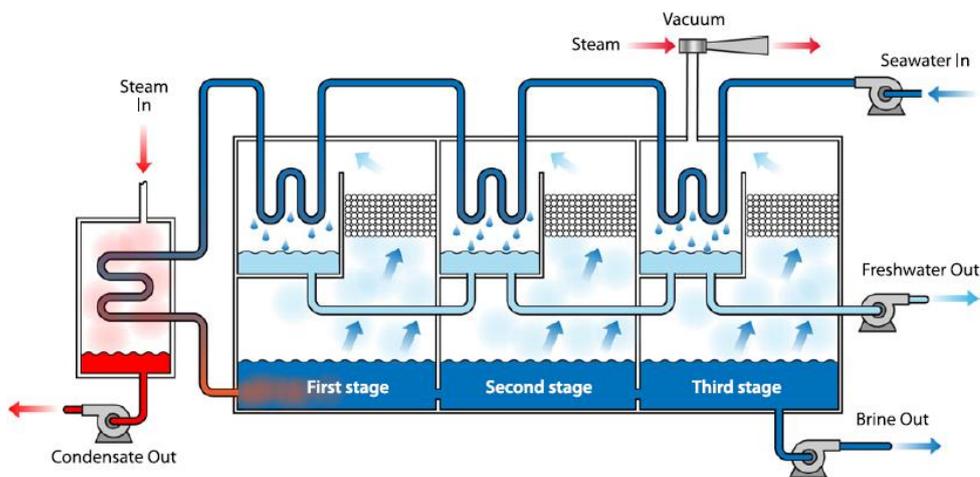


Figura 1.3. Impianto flash multistadio [8]

1.3.2 Distillazione multi-effetto (MED)

Un impianto a distillazione multi-effetto è costituito da una serie di stadi, detti effetti, il cui numero generalmente è compreso tra 4 e 16, i quali presentano livelli di pressione decrescenti. Nel primo stadio il flusso di vapore di alimentazione fluisce all'interno dei tubi orizzontali di uno scambiatore di calore e condensa cedendo il calore latente all'acqua salata, che viene spruzzata mediante degli ugelli all'esterno dei tubi. Essa viene riscaldata alla temperatura di 70°C ed evapora parzialmente, essendo la pressione inferiore a quella atmosferica. Il vapore prodotto viene utilizzato nello stadio successivo come sorgente termica, mentre la salamoia viene raccolta nella parte inferiore dello stadio e scaricata all'esterno. Dunque il vapore generato ad ogni stadio permette l'evaporazione dell'acqua nello stadio successivo, in quanto ogni stadio è ad una pressione e temperatura inferiore rispetto al precedente, rendendo quindi possibile lo scambio di calore tra il vapore e l'acqua di mare. Il vapore d'acqua generato nell'ultimo stadio viene utilizzato per preriscaldare l'acqua di mare in ingresso all'impianto. Il condensato prodotto in ciascuno stadio, ad eccezione del primo, rappresenta l'acqua dolce prodotta dall'impianto. Invece il vapore condensato nel primo stadio, essendo generato esternamente all'impianto di desalinizzazione, viene rinviato al generatore di vapore dell'impianto di alimentazione di energia termica [8].

Oltre alla configurazione a tubi orizzontali descritta esiste anche quella a tubi verticali, in cui l'acqua salata fluisce all'interno dei tubi formando un sottile film di liquido in cui avviene l'evaporazione, mentre il vapore condensa all'esterno dei tubi.

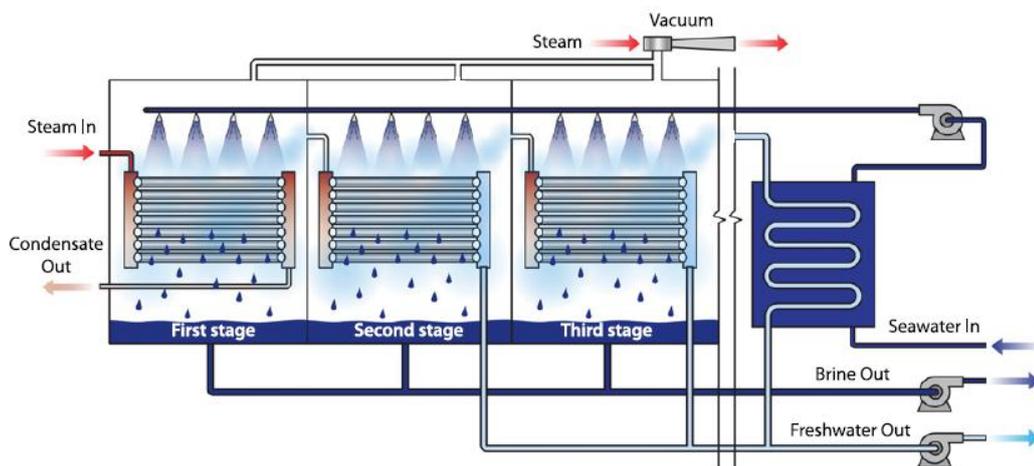


Figura 1.4. Impianto a distillazione multi-effetto [8]

Anche per questo tipo d'impianto, come per l'impianto flash multistadio, la temperatura massima è limitata a causa della possibile formazione di incrostazioni ed è pari a 70°C.

Il vantaggio rispetto ad un impianto MSF è la più bassa temperatura del vapore di alimentazione, che permette anche l'utilizzo di calore di scarto.

Generalmente la taglia di un impianto di distillazione multi-effetto va da 600 a 30000 m³/giorno [8].

Il consumo di energia viene sempre misurato in termini di energia elettrica equivalente, che per un impianto MED è compreso tra 14.45 e 21.35 kWh/m³; il GOR è compreso tra 10 e 16 kg_{distillato}/kg_{vapore}.

1.3.3 Compressione meccanica e termica di vapore (MVC/TVC)

In questo impianto viene utilizzato il calore generato dalla compressione del vapore per evaporare l'acqua di mare. Esistono due tipologie di compressione: quella meccanica, operata da un compressore alimentato da energia elettrica, e quella termica, operata da un eiettore, alimentato da un flusso di vapore ad alta pressione prodotto esternamente all'impianto di dissalazione. 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 recuperato 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 [8].

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 da 100 a 3000 m³/giorno; gli impianti a compressione termica presentano invece delle taglie comprese tra i 10000 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 7 e 12 kWh/m³. Un impianto a compressione termica, che opera con una temperatura massima di 63-70 °C e presenta un GOR=12 kg_{distillato}/kg_{vapore}, richiede energia termica e presenta un consumo di energia elettrica equivalente pari a circa 16.26 kWh/m³ [8].

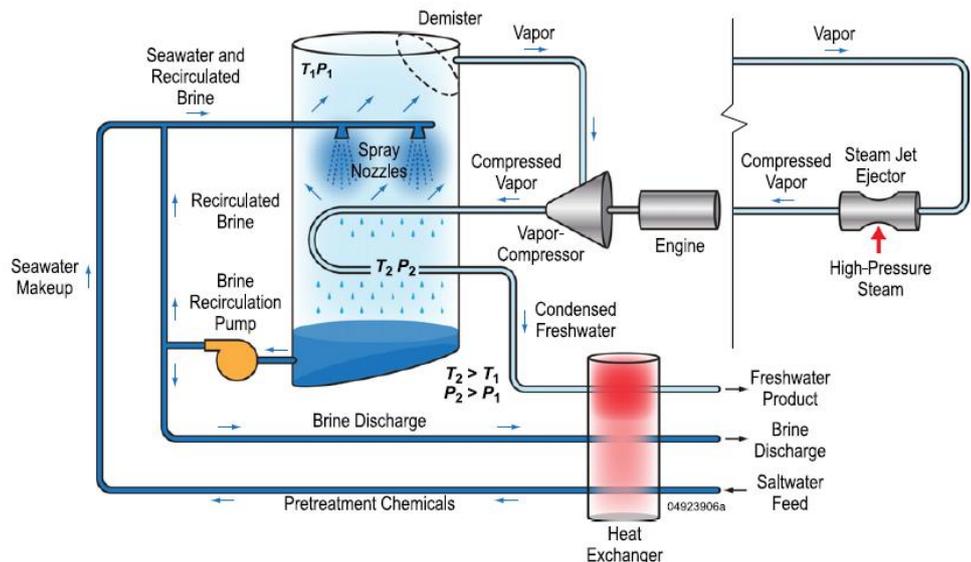


Figura 1.5. Impianto a compressione meccanica/termica di vapore [8]

1.4 Impianti a membrana

Gli impianti a membrana si basano sull'utilizzo di una membrana semipermeabile, la quale è in grado di lasciare passare le molecole di acqua attraverso di essa, ma non quelle di sale. Dal passaggio dell'acqua di mare attraverso una tale membrana si ottiene acqua dolce. A differenza dei precedenti impianti che richiedono energia termica come alimentazione, ad eccezione dell'energia elettrica assorbita dagli ausiliari e dell'impianto MVC, questi impianti invece richiedono solamente energia elettrica.

In questo paragrafo vengono riportate le tipologie d'impianto che utilizzano questa tecnologia.

1.4.1 Osmosi inversa (RO)

Gli impianti di desalinizzazione ad osmosi inversa si basano sul fenomeno dell'osmosi, che consiste nel passaggio delle molecole d'acqua attraverso una membrana semipermeabile, quando essa è interposta tra due soluzioni aventi concentrazioni di soluto diverse. Il flusso d'acqua va dalla soluzione con concentrazione minore a quella con concentrazione maggiore a causa dell'instaurarsi della pressione osmotica, proporzionale al gradiente di concentrazione. Questo fenomeno è dovuto alla necessità del sistema di

portarsi all'equilibrio, cercando di uguagliare le concentrazioni delle due soluzioni. Dal lato della soluzione che inizialmente aveva una concentrazione maggiore si crea un dislivello che esercita sulla membrana una pressione uguale ed opposta a quella osmotica. Poiché le pressioni su entrambi i lati della membrana si equivalgono, non si ha più un flusso netto di acqua e il sistema raggiunge l'equilibrio.

Se alla soluzione con concentrazione maggiore però viene applicata una pressione maggiore di quella osmotica, si instaura un flusso di acqua dalla soluzione a concentrazione maggiore a quella con concentrazione minore: questo è il processo di osmosi inversa che viene utilizzato in questa tipologia d'impianto.

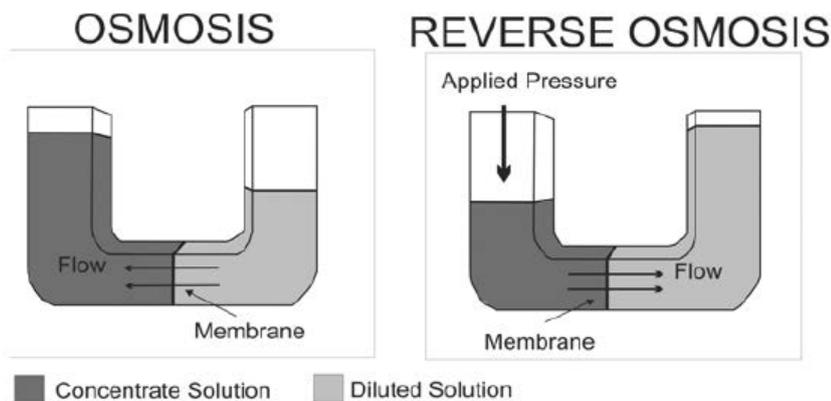


Figura 1.6. Processi di osmosi diretta e di osmosi inversa [9]

La pressione osmotica dipende dalla temperatura, ma soprattutto dalla salinità dell'acqua. Per questo motivo la pressione che è necessario applicare affinché abbia luogo il processo di osmosi inversa è compresa tra 17 e 27 bar per l'acqua salmastra e tra 55 e 82 bar per l'acqua salata [8]. Tali valori di pressione sono abbastanza più elevati rispetto al valore della pressione osmotica, che ad esempio per l'acqua di mare è di circa 28 bar, in quanto è necessario vincere anche le perdite di carico attraverso la membrana [3].

Un impianto ad osmosi inversa è costituito dai seguenti sottosistemi: pretrattamento, pompa di alta pressione, membrana, recuperatore di energia, post-trattamento.

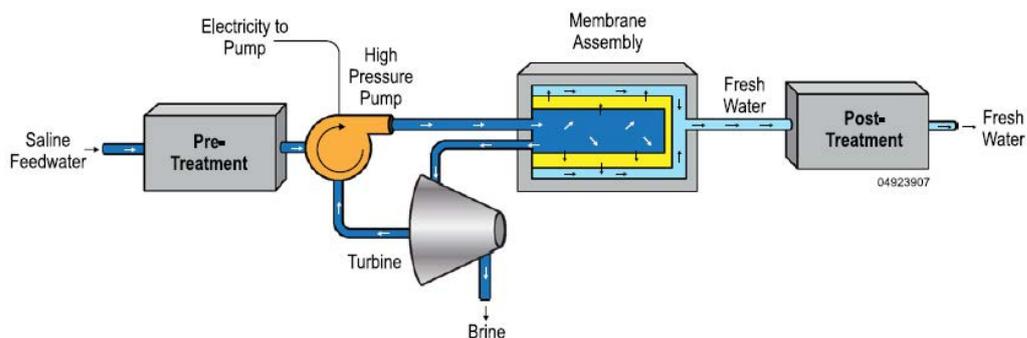


Figura 1.7. Impianto ad osmosi inversa [8]

1.4.1.1 Pretrattamento

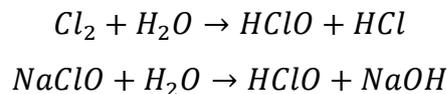
Il pretrattamento dell'acqua di mare ha la funzione di rimuovere le particelle solide, colloidali e i batteri contenuti all'interno dell'acqua da desalinizzare, prima che essa giunga alla membrana, altrimenti le impurità contenute nell'acqua potrebbero danneggiare la membrana stessa.

Si possono distinguere due gruppi di pretrattamento: quello fisico e quello chimico. Il pretrattamento fisico è costituito dalla filtrazione meccanica, sedimentazione e filtrazione mediante membrane. Il pretrattamento chimico consiste nell'aggiunta di agenti chimici per evitare la formazione di calcare e la crescita della carica batterica sulla membrana, perché potrebbero danneggiarla. Di seguito vengono riportati i pretrattamenti che devono essere effettuati.

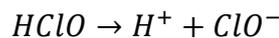
Clorazione

La clorazione consiste nell'aggiunta di cloro all'acqua, in quanto esso inibisce la crescita biologica che potrebbe danneggiare la membrana o formare un biofilm su di essa riducendo il flusso di acqua prodotta.

Il cloro viene aggiunto come ipoclorito di sodio NaClO o come gas Cl₂, che in acqua idrolizzano formando l'acido ipocloroso HClO:



In acqua l'acido ipocloroso si dissocia nel seguente modo:



La somma di Cl₂, NaClO, HClO, e ClO⁻ viene detto cloro residuo libero. Per avere un'adeguata clorazione è necessario che la concentrazione del cloro libero sia compresa tra 0,5 e 1 mg/L lungo tutta la linea di pretrattamento.

Il cloro reagisce con i composti organici riducendoli in frammenti più piccoli, i quali però diventano i nutrienti per la crescita biologica vicino alla membrana dove non c'è la presenza del cloro per non danneggiare la membrana stessa. Per evitare la crescita biologica sulla membrana, allora periodicamente si effettua un'iniezione shock di cloro ad impianto fermo e si procede con il risciacquo completo dell'impianto prima che esso parta nuovamente.

L'effetto germicida è dato soprattutto dalla presenza di HClO non dissociato, che è molto più efficace dello ione ClO⁻. L'equilibrio di dissociazione dipende dal valore del pH, dalla temperatura e dalla salinità.

Un'alternativa alla clorazione è il trattamento con raggi ultravioletti, che sono in grado di disinfettare l'acqua [9].

Agenti coagulanti e filtrazione meccanica

All'acqua di mare vengono aggiunti degli agenti coagulanti e flocculanti per adsorbire le particelle disciolte nell'acqua e formare agglomerati di materia colloidale, che poi vengono rimossi da una successiva sedimentazione e dai filtri a sabbia. Spesso si utilizzano sali di ferro e di alluminio talvolta in combinazione con dei polimeri. Gli svantaggi dell'utilizzo dei filtri a sabbia e a cartuccia sono la fluttuazione della qualità dell'acqua, la difficoltà di rimozione delle particelle con un diametro inferiore a 10-15 µm e la bassa velocità di filtrazione. È possibile utilizzare anche un sistema di flottazione ad aria disciolta combinato con la filtrazione. In questo processo circa il 10% dell'acqua che deve essere trattata viene inviato ad una pompa dove viene pressurizzato e saturato con l'aria, prima di essere rilasciato mediante degli ugelli nel flusso di acqua che abbandona la camera di flocculazione. La diminuzione improvvisa della pressione determina la formazione di bolle di circa 60 µm di dimensione, le quali trasportano in superficie le particelle presenti nell'acqua [9].

In alternativa all'utilizzo di filtri a sabbia si possono utilizzare anche delle membrane a microfiltrazione o ad ultrafiltrazione, le quali fungono da barriera contro le particelle sospese nell'acqua, il materiale colloidale e i batteri. Le membrane permettono di bloccare particelle di dimensioni minori, che invece non vengono bloccate dai tradizionali filtri a sabbia e a cartuccia. Generalmente prima che l'acqua giunga a contatto con queste membrane, si utilizzano dei filtri meccanici per la rimozione delle particelle più grossolane. Il principale vantaggio di queste membrane è come già detto la migliore rimozione delle particelle che consente di ridurre lo sporco della membrana utilizzata per l'osmosi inversa, con conseguente aumento del flusso di permeato. Inoltre l'aggiunta di agenti chimici per il trattamento di tipo chimico è significativamente ridotta rispetto al pretrattamento tradizionale. Tuttavia le membrane a microfiltrazione ed ultrafiltrazione presentano una minor durata e quindi devono essere sostituite più frequentemente rispetto ai filtri a sabbia e a cartuccia [9].

Correzione del pH

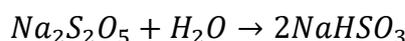
Il valore del pH dell'acqua viene corretto e spostato verso valori più bassi dove la membrana presenta delle prestazioni migliori utilizzando degli acidi come quello solforico. Questo trattamento inoltre previene il deposito di calcare [9].

Agenti antincrostanti

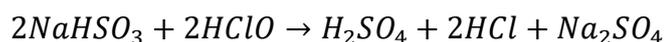
La formazione di incrostazioni sulla superficie della membrana è dovuta alla precipitazione di sali come i carbonati, i solfati e il fluoruro di calcio, a causa della sovrasaturazione. Pertanto è necessario aggiungere degli agenti antincrostanti come l'esametafosfato di sodio oppure dei composti polimerici [9].

Declorazione

Prima che l'acqua giunga a contatto con la membrana, è necessario effettuare la rimozione del cloro che è stato aggiunto precedentemente, in quanto esso ossiderebbe la membrana. Tale processo viene eseguito aggiungendo all'acqua il metabisolfito di sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$:



Il bisolfito di sodio NaHSO_3 riduce l'acido ipocloroso:



Nella pratica sono necessario 3 mg di metabisolfito di sodio per rimuovere 1 mg di cloro libero [9].

Oltre al metabisolfito di sodio un'altra tecnica di declorazione è rappresentata dall'utilizzo di carboni attivi.

1.4.1.2 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.

1.4.1.3 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, 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].

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 [9].

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

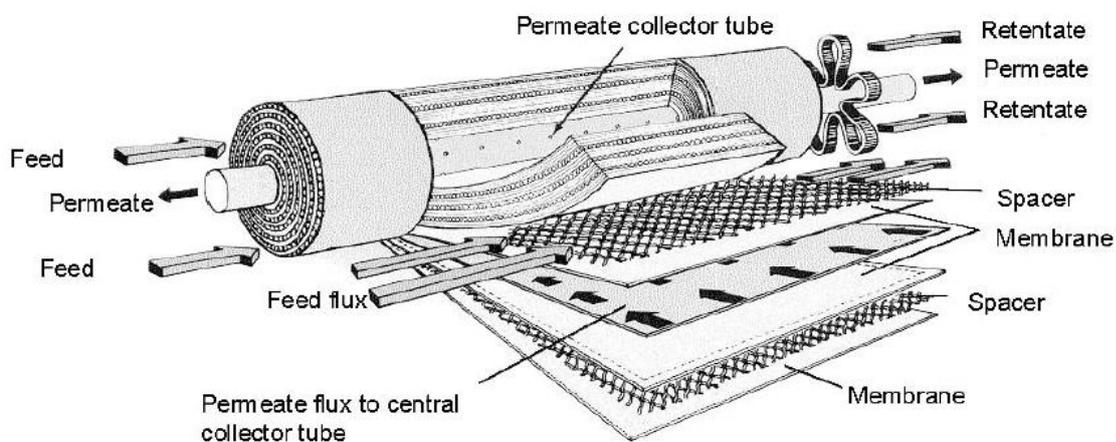


Figura 1.8. Membrana a spirale avvolta [9]

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 [9].

Scaling

Lo scaling della membrana è causato dalla sovrasaturazione 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 antincrostanti [9].

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 [9].

1.4.1.4 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 [9].

- 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 sporco 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.

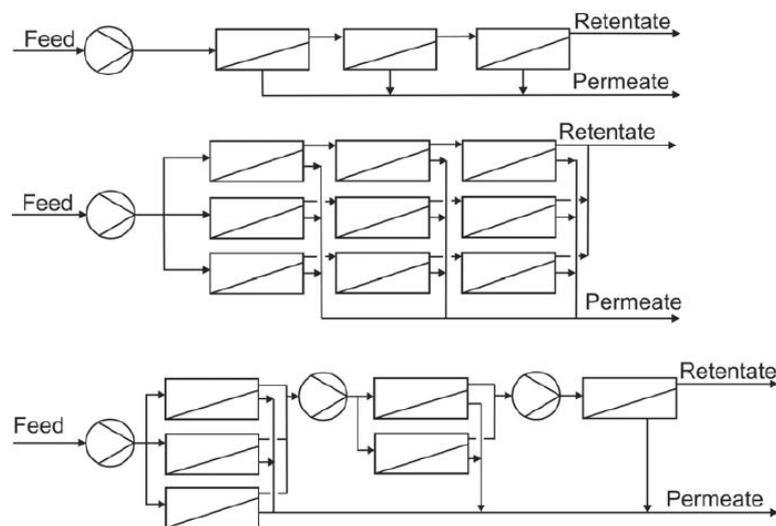


Figura 1.9. Configurazioni d'impianto: configurazione in serie (in alto), configurazione in parallelo (in centro), configurazione conica (in basso) [9]

Come già menzionato 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 [9].

1.4.1.5 Sistemi di recupero dell'energia

La salamoia quando viene scaricata ha una pressione che è simile a quella fornita dalla pompa, perciò è utile pensare di recuperare l'energia contenuta in essa, riducendo il consumo di energia dell'impianto. I primi recuperatori di energia furono la turbina Pelton e il turbocharger, i quali convertono l'energia di pressione contenuta della salamoia in energia meccanica che viene fornita alla pompa di alimentazione come energia ausiliaria. In seguito venne sviluppato un altro recuperatore più efficiente dei precedenti, ovvero lo scambiatore di pressione, il quale è in grado di trasferire la pressione della salamoia direttamente all'acqua di alimentazione [9].

- **Turbina Pelton:** questo tipo di recuperatore consiste in una turbina Pelton calettata sullo stesso albero della pompa di alimentazione. La turbina converte l'energia idraulica della salamoia in energia di meccanica, attraverso la rotazione dell'albero su cui è calettata, assistendo il motore elettrico a cui è collegata la pompa. Questo recupero permette di ridurre l'energia elettrica assorbita dal motore. L'efficienza di questo sistema è compresa tra 85% e 90% e varia al variare delle condizioni di carico. Infatti il rendimento della turbina può essere ridotto significativamente quando opera distante dalle condizioni nominali. In particolare le variazioni del flusso e della pressione dovute alla variazione stagionale della richiesta di acqua dolce determinano delle variazioni sostanziali dell'efficienza della turbina.

Lo schema d'impianto con questo tipo di recuperatore è come quello di figura 1.7.

- **Turbocharger:** questo recuperatore è costituito da una turbina ed una pompa, entrambe radiali e ad unico stadio, calettate sullo stesso albero. La salamoia di scarico passa attraverso la turbina e la sua energia idraulica viene convertita in energia meccanica,

che viene a sua volta convertita dalla pompa in energia di pressione. Prima del turbocharger è presente anche una pompa attivata da un motore elettrico, che eleva l'acqua di alimento dalla pressione iniziale fino ad un livello di pressione intermedia. La pressione viene poi aumentata fino al valore finale dal turbocharger. L'efficienza totale di questo sistema di recupero è di 70-80%.

Il fatto che il turbocharger non sia collegato ad un motore elettrico, permette di adattare la velocità di rotazione per ottimizzare l'efficienza con il carico, anziché essere fissata dal motore elettrico.

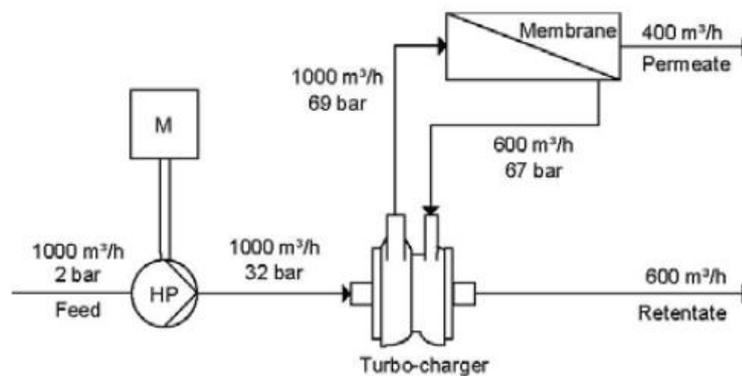


Figura 1.10. Turbocharger [9]

- Scambiatore di pressione: un sistema di recupero di questo tipo prevede l'utilizzo di una pompa ad alta pressione, uno scambiatore di pressione ed una pompa booster. Circa il 40% dell'acqua di alimentazione totale viene inviata alla pompa ad alta pressione, che aumenta la pressione di tale flusso fino al valore necessario per il processo di osmosi inversa. Il restante 60% viene inviato allo scambiatore di pressione. Esso è costituito da un rotore ceramico con vari condotti, all'interno dei quali da lati opposti entrano l'acqua di mare di alimentazione dell'impianto e la salamoia. La salamoia cede all'acqua di mare la propria energia di pressione ed infine lascia il recuperatore. La rotazione del rotore è effettuata dal flusso di acqua e garantisce il continuo ingresso di acqua salata e il continuo scarico della salamoia. Con questo sistema viene recuperata una buona parte dell'energia della salamoia, che altrimenti andrebbe persa. L'efficienza di questo sistema è molto elevata, circa il 94%, e non dipende dalle condizioni di carico, come accade invece per gli altri recuperatori. Poiché il processo non è ideale ci sono delle perdite, quindi la pressione dell'acqua di mare che lascia lo scambiatore di pressione è inferiore a quella necessaria per il processo. Per tale motivo l'acqua in uscita dal recuperatore viene inviata ad una pompa booster che eleva la pressione fino al valore desiderato. A questo punto tale flusso d'acqua si unisce al flusso in uscita dalla pompa ad alta pressione.

All'interno dei condotti c'è contatto diretto tra l'acqua di alimento e la salamoia che viene scaricata, quindi c'è un certo miscelamento, ma essendo molto basso solitamente viene trascurato. La rotazione del rotore è determinante per la minimizzazione del miscelamento.

Un altro vantaggio di questo sistema è il fatto che si può utilizzare una pompa ad alta pressione di taglia inferiore, perché solamente il 40% dell'acqua di alimentazione passa attraverso essa.

Questo tipo di recuperatore ha però un costo d'investimento maggiore rispetto ai precedenti, ma presenta delle prestazioni migliori, anche nelle condizioni di fuori progetto.

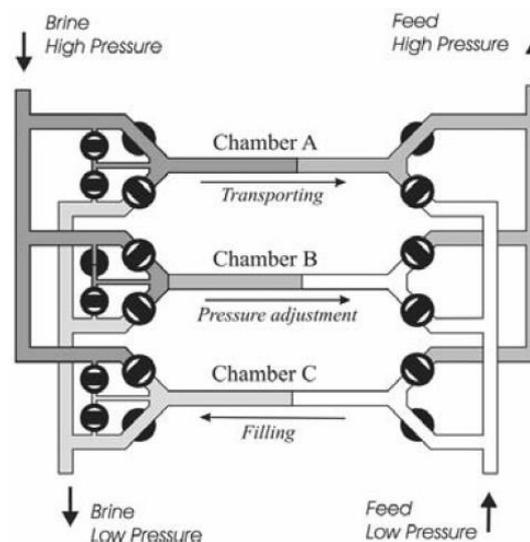


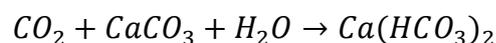
Figura 1.11. Scambiatore di pressione [9]

1.4.1.6 Post-trattamento

L'acqua dolce prodotta mediante il processo di osmosi inversa ha un basso contenuto di sali e quindi non è potabile. Per renderla tale è necessaria l'aggiunta di alcuni sali, la correzione del pH e del contenuto di CO₂.

Remineralizzazione

Uno dei metodi più diffusi per la remineralizzazione dell'acqua è la dissoluzione del carbonato di calcio con l'anidride carbonica, secondo la seguente reazione:



Questo processo consente di aumentare l'alcalinità dell'acqua.

Poiché la velocità di reazione è bassa, non tutta la CO_2 reagisce, quindi è necessaria la sua neutralizzazione attraverso l'aggiunta di NaOH o Na_2CO_3 . Negli impianti di taglia maggiore, invece, si preferisce rimuovere la CO_2 con dei degasatori piuttosto che neutralizzarla, in quanto la rimozione risulta essere più economica [9].

Rimozione del boro

Il trattamento ad osmosi inversa non è efficace per la rimozione del boro, che è pericoloso per la salute umana se presente nell'acqua ad elevate concentrazioni. Per questo motivo l'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) pone come limite massimo un contenuto di boro in acqua pari a 0.5 mg/L.

La rimozione del boro avviene mediante delle resine selettive, che possiedono degli ioni mobili, i quali vengono scambiati con gli ioni di boro. Questo processo è molto efficiente, infatti permette di ottenere una riduzione del contenuto di boro del 99%. Solitamente sono presenti due colonne in parallelo di queste resine per assicurare il funzionamento continuo, dal momento che esse devono essere periodicamente rigenerate con soda caustica e acido cloridrico [9].

1.4.1.7 Capacità e consumo di energia

La taglia di un impianto ad osmosi inversa va da 0.1 m³/giorno per le applicazioni marine o domestiche fino a 395000 m³/giorno per le applicazioni commerciali.

L'energia consumata dall'impianto è solamente energia elettrica, il cui consumo dipende dal grado di salinità dell'acqua e dal tasso di recupero. Per gli impianti che trattano acqua di mare e che possiedono un sistema per il recupero dell'energia dalla salamoia il consumo è nell'intervallo 4-6 kWh/m³, mentre per gli impianti che trattano acqua salmastra il consumo è di 1.5-2.5 kWh/m³ [8].

Il rapporto tra la portata d'acqua prodotta e la portata d'acqua di alimentazione è detto "recovery ratio", il cui valore dipende da fattori come la pressione applicata e la salinità dell'acqua da dissalare. Un valore elevato del recovery ratio determina non solo un'elevata produzione di acqua dolce, ma anche una maggiore pressione da fornire, il che implica un maggior consumo di energia, pertanto generalmente non si utilizzano valori troppo elevati di questo fattore. Per gli impianti che trattano acqua di mare il recovery ratio solitamente può raggiungere valori fino a 60%, mentre per gli impianti che trattano acqua salmastra tale fattore può raggiungere valori più alti fino a 75-80% [9].

Una variante dell'impianto ad osmosi inversa consiste nel preriscaldare l'acqua di alimentazione, in modo tale da aumentare la permeabilità della membrana. Infatti, un aumento della temperatura di 4°C determina un aumento del 10% del flusso di acqua prodotta. Nonostante l'aumento di temperatura determini un incremento della pressione

osmotica, esso determina anche una diminuzione della viscosità dell'acqua, nonché una diminuzione delle perdite di carico con conseguente riduzione dei consumi di energia elettrica. Si ottiene infatti fino a circa il 10% di risparmio passando da 20°C a 30°C [3].

1.4.2 Elettrodialisi (ED)

Un impianto di dissalazione ad elettrodialisi si basa sul processo di separazione elettrochimica alla pressione atmosferica. L'unità di tale impianto è costituita da due elettrodi, uno carico positivamente e l'altro carico negativamente connessi esternamente a una sorgente di corrente continua, e da membrane selettive poste in parallelo per formare dei canali. Le membrane sono selettive in quanto permettono il passaggio degli ioni di sale, ma non delle molecole d'acqua e sono di due tipi: quelle cationiche, che consentono il passaggio degli ioni positivi (cationi) e quelle anioniche, che consentono il passaggio degli ioni negativi (anioni).

In seguito alla differenza di potenziale generata dalla sorgente di corrente continua, i cationi essendo attratti dall'elettrodo negativo, il catodo, passano attraverso la membrana cationica giungendo nel canale adiacente a quello di alimentazione, mentre gli anioni essendo attratti dall'elettrodo positivo, l'anodo, attraversano la membrana anionica passando nell'altro canale adiacente. In questo modo all'uscita del canale di alimentazione si ottiene acqua desalinizzata, mentre nei due canali adiacenti è presente la salamoia.

Questo tipo di impianto è adatto solo alla desalinizzazione di acqua a ridotto contenuto di sale come l'acqua salmastra, preferibilmente con salinità inferiore a 5000 ppm. Infatti se si utilizzasse acqua molto salata si avrebbe la migrazione degli ioni di sale solamente nello strato di acqua vicino alle membrane, mentre in centro continuerebbe ad esserci acqua salata.

La polarità degli elettrodi è invertita periodicamente, circa ogni 20 minuti, in modo tale da invertire i flussi d'acqua. Questo accorgimento permette di aumentare la vita degli elettrodi ed aiuta la pulizia delle membrane, infatti se i flussi restassero invariati si formerebbero dei precipitati dal lato del concentrato.

La capacità di un impianto di questo tipo generalmente va da 2 a 145000 m³/giorno.

Il consumo di energia elettrica di tale impianto corrisponde a 0.7-2.5 kWh/m³ per acqua con un contenuto di sali inferiore a 2500 ppm, mentre per acqua con un contenuto di sali maggiore di 2500 ppm il consumo di energia è di 2.64-5.5 kWh/m³ [8].

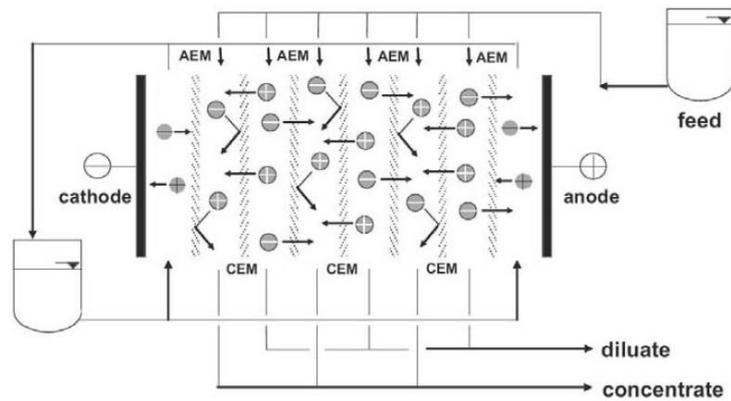


Figura 1.12. Impianto ad elettrodialisi [9]

1.4.3 Osmosi diretta (FO)

Oltre agli impianti ad osmosi inversa esistono anche gli impianti ad osmosi diretta, i quali si basano su tale fenomeno, già descritto nel paragrafo 1.4.1.

Il processo di desalinizzazione mediante l'osmosi diretta si divide in due parti: nella prima avviene la diluizione di una soluzione ad alta pressione osmotica detta "draw solution" mediante il processo di osmosi diretta, nella seconda viene generata acqua dolce dalla soluzione diluita [11]. Nella prima parte del processo l'acqua, che deve essere desalinizzata, entra nella sezione di osmosi diretta: qui le molecole di acqua, soggette alla forza motrice della pressione osmotica, attraversano la membrana e giungono nella "draw solution", la quale viene diluita e così passa nella seconda sezione dell'impianto. La sezione in cui avviene generazione dell'acqua dolce può essere di diverso tipo. Un primo metodo consiste nel fornire calore alla temperatura di circa 60 °C alla "draw solution" diluita in modo tale da separare i gas volatili, di cui è composta, dall'acqua dolce: l'acqua viene recuperata mentre i gas vengono fatti ricircolare. Un esempio di "draw solution" è una soluzione costituita da NH_3 e CO_2 . Il recovery ratio di questo sistema è di circa 64%, il consumo di energia elettrica equivalente è di circa 0.25 kWh/m³ [12].

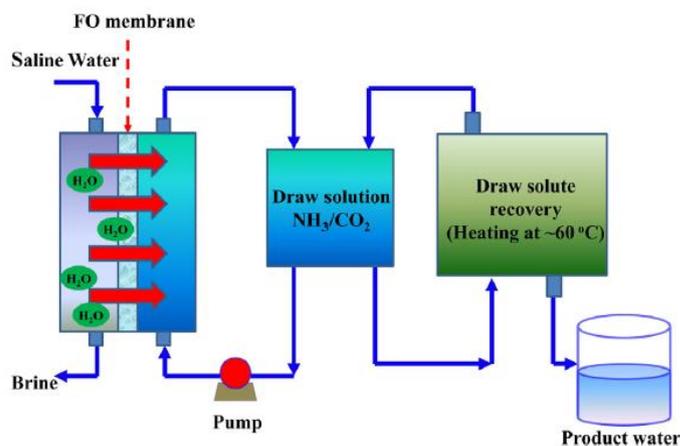


Figura 1.13. Impianto ad osmosi diretta NH_3/CO_2 [12]

Un secondo metodo invece consiste nell'utilizzare l'acqua salata come "draw solution" e una membrana per l'osmosi inversa come sezione per la produzione di acqua dolce. In questo modo si ottiene un impianto ibrido ad osmosi diretta-osmosi inversa: nella prima parte le molecole di acqua passano attraverso la membrana verso la soluzione a maggiore concentrazione di soluto, nella seconda avviene la produzione di acqua dolce come in un tradizionale impianto ad osmosi inversa. Utilizzando una sezione ad osmosi diretta prima di quella ad osmosi inversa è possibile ottenere dell'acqua dolce di maggiore qualità, la riduzione dello sporcamento della membrana per l'osmosi inversa, un minor consumo energetico e l'eliminazione del pretrattamento chimico, in quanto l'osmosi diretta funge da processo di pretrattamento. Il consumo di energia elettrica è di 1.5 kWh/m³, circa la metà di quello di un impianto ad osmosi inversa [12].

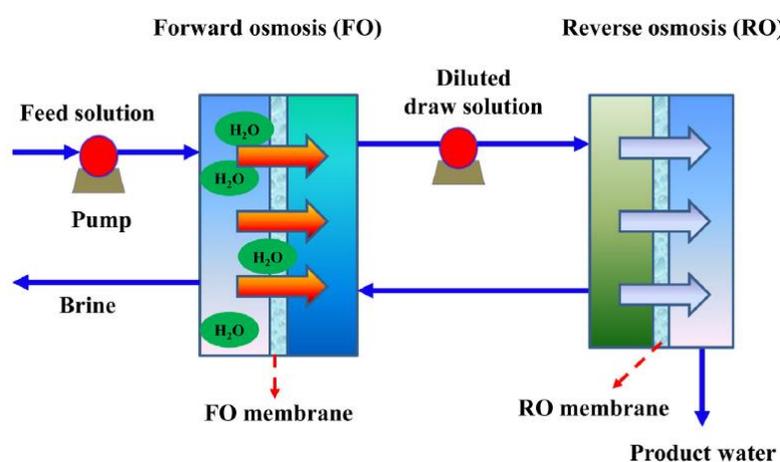


Figura 1.14. Impianto ibrido ad osmosi diretta-osmosi inversa [12]

1.5 Confronto tra le diverse tecnologie

Gli impianti a membrana come quelli ad osmosi inversa sono più delicati, perché la membrana è sensibile allo sporcamento, e una non corretta gestione dell'impianto potrebbe provocare dei danneggiamenti alla membrana stessa. Dunque, un impianto ad osmosi inversa richiede per il suo funzionamento il lavoro di un personale qualificato, che sia in grado di gestirlo correttamente. Per tale motivo in zone remote si preferisce l'installazione di impianti ad elettrodialisi che sono meno delicati e la cui gestione e manutenzione sono più semplici [13].

Gli impianti di desalinizzazione evaporativi permettono di ottenere un prodotto di maggiore qualità, cioè con un minor contenuto di sali, soprattutto se l'acqua da trattare è inquinata

La tendenza attuale è quella di preferire gli impianti ad osmosi inversa per la produzione di acqua potabile e gli impianti evaporativi per la produzione di acqua di processo e a fini

industriali, in quanto per la produzione dell'acqua potabile è necessario rispettare solamente i parametri dell'acqua organolettica, che sono meno spinti di quelli dell'acqua richiesta per processi industriali [3].

Come si può osservare dal grafico di figura 1.15, gli impianti maggiormente diffusi sono quelli a flash multistadio, a distillazione multi-effetto e quelli ad osmosi inversa.

Infine in tabella 1.1 vengono riassunte le caratteristiche dei principali impianti di desalinizzazione.

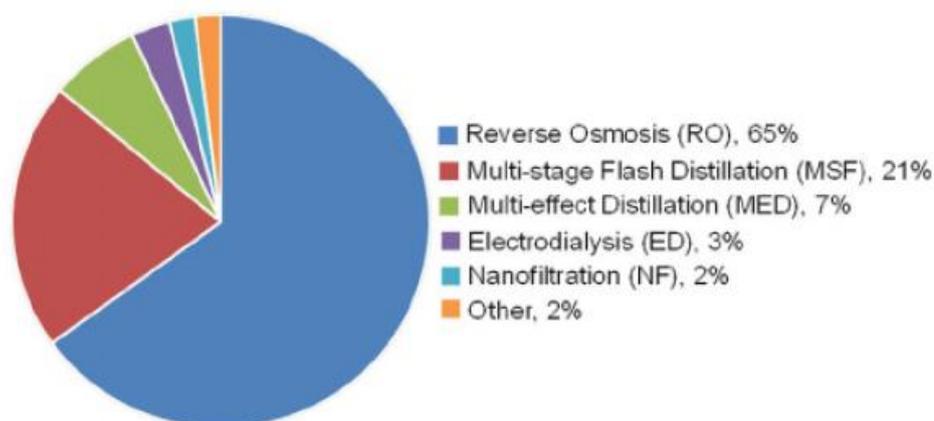


Figura 1.15. Capacità installata degli impianti di desalinizzazione nel mondo [7]

Tabella 1.1. Confronto tra i principali impianti di desalinizzazione [8]

Proprietà	MSF	MED	MVC	TVC	SWRO	BWRO	ED
Dimensione di un'unità [m ³ /giorno]	50000-70000	5000-15000	100-3000	10000-30000	fino a 128000	fino a 980000	2-145000
Consumo di energia elettrica [kWh/m ³]	2.5-5	2-2.5	7-12	1.8-1.6	4-6	1.5-2.5	2.64-5.5
Consumo di energia termica [MJ/m ³]	190-282	145-230	-	227	-	-	-
Equivalente elettrico dell'energia termica [kWh/m ³]	15.83-23.5	12.2-19.1	-	14.5	-	-	-
Consumo totale di energia elettrica [kWh/m ³]	19.58-27.25	14.45-21.35	7-12	16.26	4-6	1.5-2.5	2.64-5.5, 0.7-2.5 con basso TDS
Qualità dell'acqua prodotta [ppm]	≈10	≈10	≈10	≈10	400-500	200-500	150-500

1.6 Impianti alimentati da energie rinnovabili

La principale criticità della desalinizzazione è il consumo di energia per l'alimentazione di tali impianti. Tale energia spesso viene fornita da impianti che utilizzano fonti fossili, le quali però sono esauribili e il loro impegno determina la produzione di CO₂, che è la causa principale dell'effetto serra antropico.

Per tale motivo sono particolarmente interessanti gli impianti di desalinizzazione alimentati da fonti di energia rinnovabile come ad esempio l'energia solare, eolica, geotermica, in quanto essendo rinnovabili non sono soggette alla scarsità come le fonti fossili e soprattutto sono fonti di energia pulita, perché non alterano la quantità di CO₂ presente in atmosfera. Gli impianti di questo tipo non presentano costi operativi, in quanto l'energia di alimentazione è fornita gratuitamente dalle risorse rinnovabili, ma presentano elevati costi d'investimento, i quali però possono abbassarsi con l'evoluzione della tecnologia [8].

Le fonti rinnovabili come il sole e il vento però presentano il problema della variabilità nella loro disponibilità. La produzione di energia da tali fonti risulta essere discontinua e questo si riflette sul funzionamento dell'impianto di dissalazione. Per risolvere tale problema ci sono tre soluzioni [10]:

1. Utilizzo di fonti fossili per colmare la differenza tra la richiesta di energia e la disponibilità della risorsa rinnovabile in modo tale che l'impianto funzioni continuamente;
2. Immagazzinare l'eccesso di energia prodotta dalla fonte rinnovabile ed utilizzarla in tempi successivi per permettere all'impianto di funzionare continuamente;
3. Far funzionare l'impianto in maniera intermittente.

La prima opzione include anche la connessione dell'impianto di dissalazione alla rete elettrica, dalla quale viene assorbita energia quando le risorse solare ed eolica non sono disponibili. La seconda e la terza opzione prevedono il solo utilizzo di fonti rinnovabili per il funzionamento dell'impianto e questo, se possibile, è preferibile perché non viene utilizzata alcuna fonte fossile.

In questo paragrafo vengono presentate varie tipologie d'impianti alimentati da fonti di energia rinnovabile, includendo sia le tecnologie consolidate sia quelle ancora in fase di sperimentazione.

1.6.1 Solar stills

Questa tipologia d'impianto utilizza l'energia solare come fonte di alimentazione per la produzione di acqua desalinizzata e sfrutta il principio dell'effetto serra. 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 formatosi, venendo a contatto con la superficie fredda di vetro, condensa su di essa e l'acqua dolce così prodotta viene raccolta.

Mediamente la produzione giornaliera di acqua dolce non è molto elevata ed è compresa tra 4 e 6 L/(giorno·m²), pertanto questa tecnologia risulta essere conveniente soprattutto in zone remote in cui la richiesta di acqua è bassa [8].

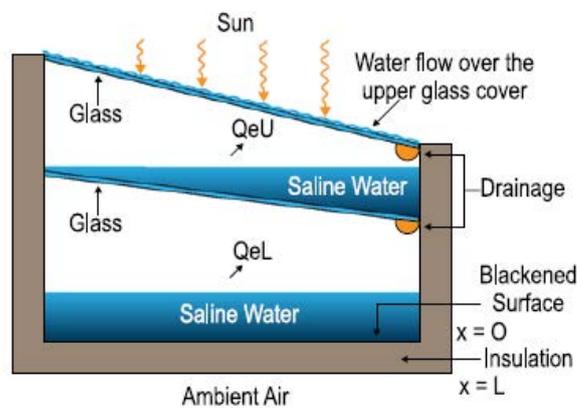


Figura 1.16. Solar still [8]

1.6.2 Solar ponds

I solar ponds sono dei sistemi per la captazione e l'accumulo dell'energia solare. Un solar pond è un serbatoio contenente acqua salata in cui è possibile distinguere tre diversi strati: lo strato superiore detto zona convettiva superiore, quello centrale detto zona non convettiva o zona di gradiente di salinità, quello inferiore chiamato zona convettiva inferiore. Gli strati superiore ed inferiore presentano una salinità costante, mentre nello strato centrale la salinità aumenta con la profondità. La temperatura nello strato superiore è prossima a quella ambiente mentre nello strato inferiore, dove la concentrazione di sale è maggiore, si può raggiungere una temperatura di 90°C. Data l'elevata quantità di energia termica che viene accumulata nei solar ponds, questi sistemi possono essere utilizzati per alimentare in modo continuo gli impianti di desalinizzazione di tipo termico, come flash multi-stadio o distillazione multi-effetto. In alternativa il calore accumulato può essere utilizzato come sorgente di energia termica per la produzione di energia elettrica attraverso un impianto operante con ciclo Rankine. L'energia elettrica prodotta può successivamente essere utilizzata per l'alimentazione di un impianto ad osmosi inversa, a compressione meccanica di vapore o un impianto ad elettrodialisi. Il vantaggio dell'accumulo di una grande quantità di energia termica è la continuità di funzionamento anche in assenza della radiazione solare, come di notte o nei giorni nuvolosi. Infine la salamoia prodotta dall'impianto di dissalazione può infine essere utilizzata per la realizzazione del solar pond [8].

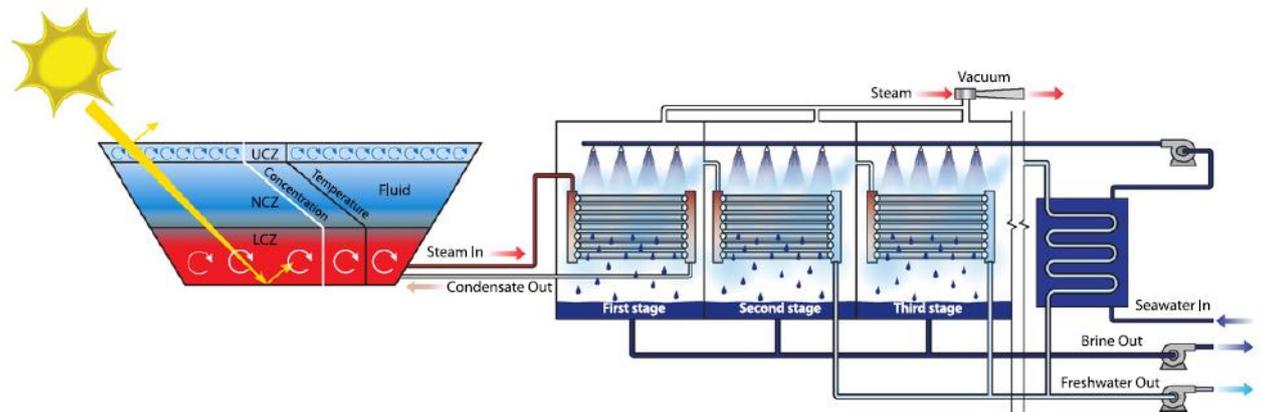


Figura 1.17. Impianto MED accoppiato con solar pond [8]

1.6.3 Umidificazione solare multi-effetto

Questa tipologia d'impianto si basa sull'umidificazione e la successiva deumidificazione di un flusso d'aria per ottenere acqua desalinizzata. Un'unità è costituita da un evaporatore, dove l'aria viene umidificata, e da un condensatore, dove l'acqua dolce viene recuperata. Esistono due tipi di configurazione d'impianto: nella prima il circuito in cui fluisce l'aria è chiuso, nella seconda invece il circuito dell'aria è aperto.

Nella prima configurazione l'acqua di mare, passando attraverso il condensatore, viene preriscaldata dal calore latente di condensazione dell'acqua dolce. Successivamente l'acqua di mare fluisce attraverso dei collettori solari termici, dove viene riscaldata fino alla temperatura di circa 85°C, e viene perciò inviata all'evaporatore. Qui l'acqua di mare viene nebulizzata, mentre un flusso d'aria passa attraverso l'evaporatore, venendo così umidificato. Il flusso carico di umidità giunge perciò al condensatore dove viene a contatto con le superfici fredde dei tubi all'interno dei quali scorre l'acqua di mare. Alla base del condensatore viene raccolta l'acqua dolce prodotta, mentre il flusso d'aria passa nuovamente attraverso l'evaporatore per iniziare un nuovo ciclo.

Il funzionamento della seconda configurazione è del tutto analogo a quello precedente, l'unica differenza è che il flusso d'aria non viene ricircolato totalmente, ma una parte di esso viene scaricata all'esterno mentre l'altra parte si miscela con la portata d'aria di rinnovo.

Oltre all'energia termica viene richiesta anche energia elettrica, la quale viene assorbita dalle pompe e dai ventilatori per la movimentazione dei flussi di acqua e di aria. Affinché l'impianto sia completamente alimentato da fonti di energia rinnovabile, è necessario che anche l'energia elettrica sia prodotta da risorse di questo tipo, ad esempio è possibile pensare di produrre tale energia utilizzando dei pannelli fotovoltaici. Il consumo totale di energia espresso in termini di energia elettrica equivalente è di circa 31 kWh/m³ [8].

Le taglie tipiche di questa tipologia d'impianto sono comprese tra 1 e 100 m³/giorno.

I principali vantaggi dell'umidificazione solare multi-effetto sono la flessibilità, i bassi costi d'investimento e di funzionamento, la possibilità di utilizzo dell'energia solare.

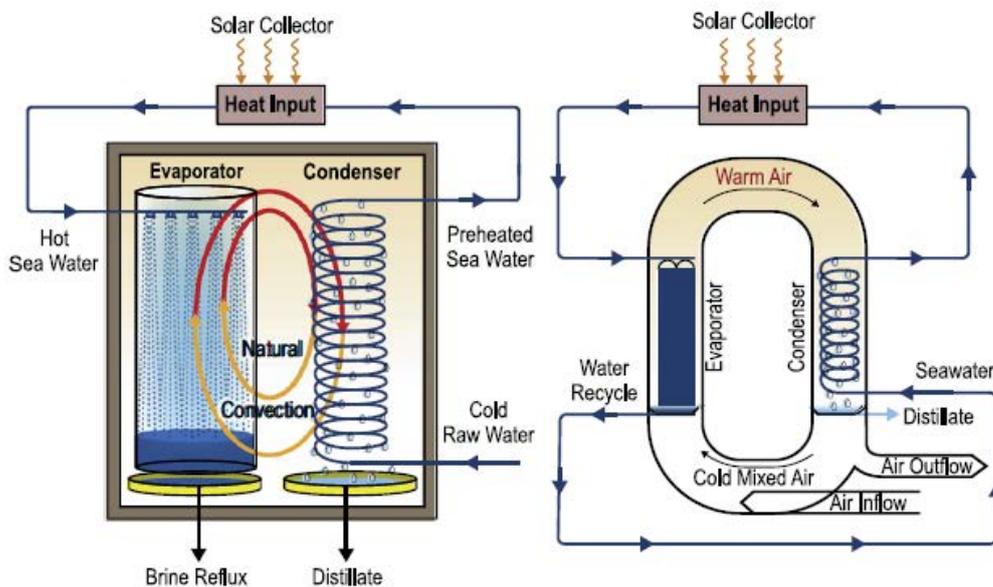


Figura 1.18. Impianto ad umidificazione solare multi-effetto [8]

1.6.4 Distillazione solare a membrana

Un impianto a distillazione a membrana si basa sulla tecnica di separazione e distillazione, in cui il vapore d'acqua viene trasportato tra un flusso caldo e uno freddo di acqua di mare, separati da una membrana idrofobica, che permette il solo passaggio del vapore d'acqua impedendo invece il flusso della fase liquida e delle particelle disciolte in essa. I due flussi d'acqua di mare presentano una piccola differenza di temperatura, che determina una differenza nella pressione parziale del vapore, la quale funge da forza motrice per il passaggio del vapore attraverso la membrana. Il vapore, una volta attraversata la membrana, viene a contatto con una superficie condensante che è raffreddata dall'acqua salata di alimentazione, la quale, assorbendo il calore latente di condensazione, si preriscalda. L'acqua preriscaldata viene poi riscaldata fino alla temperatura di circa 80°C all'interno dei collettori solari termici e quindi passa dal lato caldo della membrana.

Il principale vantaggio di questo sistema è la semplicità e la bassa differenza di temperatura, ma è proprio quest'ultima a determinare una bassa efficienza energetica dell'impianto.

Infatti la capacità produttiva di tale impianto è bassa e varia tra 0.15 e 10 m³/giorno, mentre il consumo di energia termica è piuttosto elevato, pari a circa 150-200 kWh/m³ [8].

Questo tipo d'impianto non è ancora disponibile a livello commerciale.

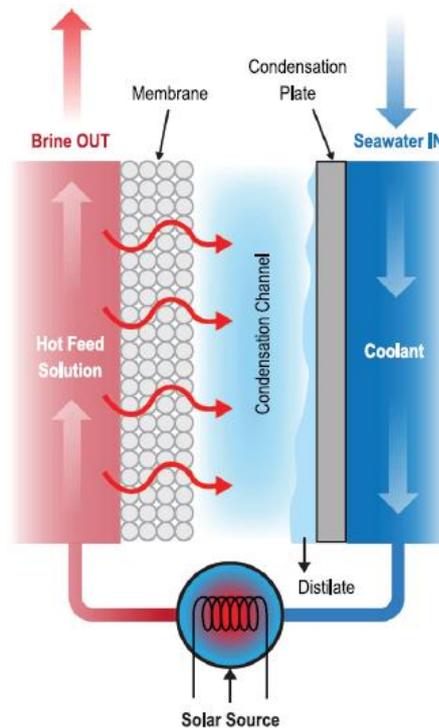


Figura 1.19 Unità di distillazione solare a membrana [8]

1.6.5 Impianti tradizionali alimentati da una fonte di energia rinnovabile

Oltre agli impianti descritti precedentemente i quali sono stati studiati appositamente per l'accoppiamento con la risorsa solare, esistono anche degli impianti tradizionali, come quelli descritti nei paragrafi 1.3 e 1.4, che sono alimentati da una certa fonte rinnovabile anziché da degli impianti convenzionali di produzione dell'energia [8].

Un primo esempio è dato dall'accoppiamento di un impianto CSP con un impianto di dissalazione tradizionale di tipo evaporativo o a membrana. Un impianto CSP (*concentrating solar power*) consiste nella concentrazione della radiazione solare al fine di ottenere del calore ad alta temperatura, che viene usato per la produzione di energia elettrica mediante un ciclo termodinamico convenzionale, ad esempio mediante una turbina a vapore, una turbina a gas o un motore Stirling.

È possibile accoppiare un tale impianto con un impianto a distillazione multi-effetto oppure ad osmosi inversa. Nel primo caso (figura 1.20) l'impianto è costituito da dei collettori solari parabolici che forniscono il calore necessario per la generazione di vapore surriscaldato alla temperatura di circa 380°C, il quale espande in turbina producendo energia meccanica e quindi energia elettrica. Il calore del vapore in uscita dalla turbina viene usato per alimentare l'impianto di distillazione multi-effetto, che richiede calore alla temperatura massima di circa 70°C, perciò la temperatura del vapore è sufficiente ad

alimentare tale impianto. Nel secondo caso, invece, si produce energia elettrica che viene utilizzata per alimentare un impianto ad osmosi inversa. Quest'ultimo impianto è più efficiente di quello precedente e richiede l'impiego di una quantità inferiore di energia.

È possibile utilizzare la radiazione solare anche per la produzione diretta di energia elettrica mediante dei pannelli fotovoltaici, i quali alimentano un impianto di desalinizzazione a membrana.

L'accoppiamento tra pannelli fotovoltaici ed un impianto ad osmosi inversa è una delle configurazioni più promettenti. Poiché i pannelli fotovoltaici producono corrente continua è necessario l'utilizzo di un inverter per la conversione della corrente continua in alternata, la quale viene richiesta per l'alimentazione della pompa. Data l'aleatorietà della risorsa solare è possibile avere un funzionamento continuo dell'impianto solo se si utilizza un sistema di accumulo dell'energia come ad esempio delle batterie.

Il campo fotovoltaico può anche essere accoppiato con un impianto di elettrodialisi. In questo caso però non è necessario l'impegno di un inverter, in quanto gli elettrodi richiedono una sorgente di corrente continua che perciò è rappresentata dai pannelli fotovoltaici.

Un'altra fonte di energia rinnovabile che viene utilizzata è il vento. L'energia eolica viene convertita in energia meccanica, e successivamente in energia elettrica, dalle turbine eoliche e quindi viene impiegata per il funzionamento di un impianto ad osmosi inversa o di un impianto a compressione meccanica del vapore. Anche in questo caso si utilizza una batteria, o un altro sistema di accumulo dell'energia, per ovviare all'aleatorietà della risorsa eolica.

Anche l'energia geotermica può essere utilizzata per la produzione di acqua desalinizzata. Il vantaggio di questa forma di energia è che non richiede l'impiego di alcun accumulo termico, in quanto non è soggetta all'aleatorietà tipica della risorsa solare e della risorsa eolica.

Una risorsa geotermica ad alta pressione può essere usata direttamente in un impianto di desalinizzazione meccanica, mentre una risorsa geotermica ad alta temperatura viene utilizzata per la produzione di energia elettrica, ad esempio mediante un impianto ORC (*organic Rankine cycle*), impiegata poi come alimentazione di un impianto di desalinizzazione. Tuttavia molti degli impianti di dissalazione che utilizzano l'energia geotermica sono di tipo evaporativo, i quali vengono alimentati direttamente dal calore del sottosuolo.

Infine esistono anche impianti che utilizzano più fonti rinnovabili, come la radiazione solare e l'energia eolica. Questo permette di migliorare il problema della variabilità delle risorse: infatti l'impianto continua a funzionare anche in assenza di una delle due risorse, permettendo quindi di avere una maggiore continuità di funzionamento. Gli impianti di

questa tipologia sono detti ibridi e un esempio è dato da un impianto a membrana alimentato dall'energia elettrica prodotta da pannelli fotovoltaici e da turbine eoliche.

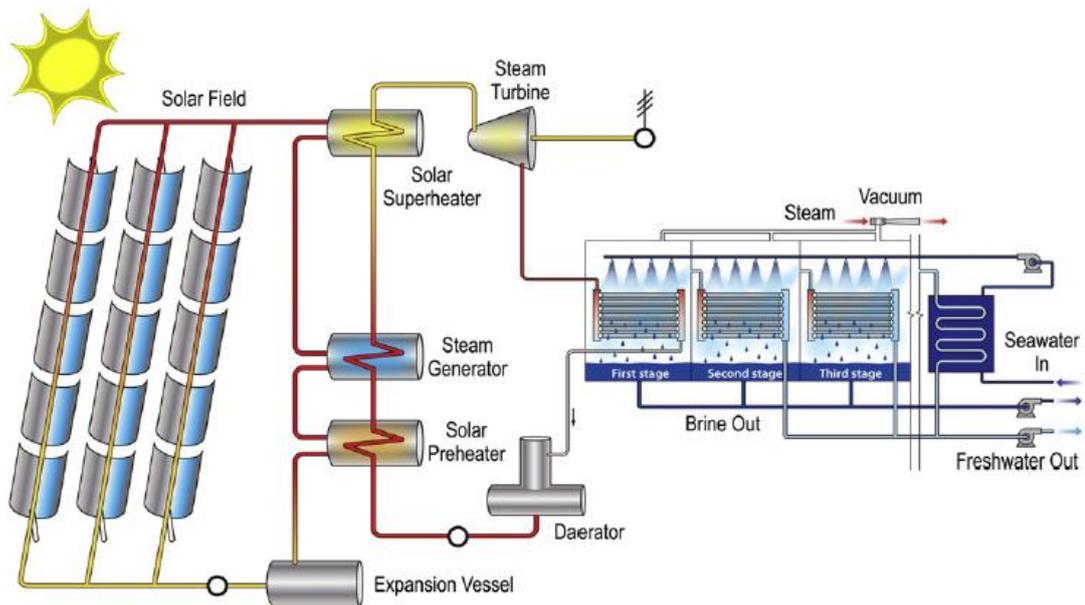


Figura 1.20 Impianto CSP accoppiato con impianto MED [8]

Capitolo II

Realizzazione del modello di un impianto di desalinizzazione

In questo capitolo viene descritta la realizzazione del modello di un impianto di desalinizzazione e produzione di energia elettrica, alimentato da fonti rinnovabili. Lo scopo è quello di valutare l'eventualità dell'inserimento di un tale impianto in un contesto che richiede la produzione di acqua desalinizzata e di energia elettrica, individuando la configurazione più adatta al caso e studiandone il funzionamento durante un anno tipo, mediante una simulazione.

2.1 Individuazione del contesto

Per la realizzazione del modello di un impianto di desalinizzazione e di produzione di energia elettrica, è necessario innanzitutto l'individuazione di un possibile contesto in cui inserire tale impianto. È stato riscontrato che le isole del bacino del Mediterraneo, come ad esempio le isole Egee situate in Grecia, sono particolarmente sensibili alla carenza idrica, ma possedendo una grande riserva di acqua salata sono adatte all'installazione di impianti di desalinizzazione.

Infatti, come si legge in [1], le isole Egee, come anche altre isole del Mediterraneo, sono caratterizzate da una scarsa piovosità e spesso le riserve di acqua non sono sufficienti a soddisfare il fabbisogno idrico. Inoltre nella stagione estiva le isole sono soggette ad un grande aumento della domanda di acqua, determinato dal turismo: ciò comporta un'intensificazione del problema della mancanza di acqua potabile. Per ovviare a questa mancanza si rende necessaria l'importazione di serbatoi di acqua il cui costo però è elevato, circa 5-8 €/m³. Tuttavia, data la grande riserva di acqua salata disponibile, potrebbe essere più conveniente l'installazione di un impianto di desalinizzazione, che sia in grado di produrre una quantità di acqua tale da soddisfare la domanda idrica dell'isola ad un costo specifico più basso di quello sostenuto per l'importazione della risorsa. Inoltre, poiché in queste zone le risorse solare ed eolica sono ampiamente disponibili, è possibile alimentare tale impianto con degli impianti che utilizzano fonti di energia rinnovabile.

Per queste ragioni si è pensato di considerare le isole Egee come possibile zona per l'inserimento di un impianto per la desalinizzazione dell'acqua di mare alimentato da fonti rinnovabili, prendendo come riferimento il caso di studio descritto nell'articolo [1].

2.2 Configurazione dell'impianto

La tecnologia di dissalazione più adatta al caso di studio considerato è l'osmosi inversa, in quanto presenta un modesto consumo specifico di energia e si adatta bene all'accoppiamento con impianti alimentati da energia rinnovabile. Un impianto di tipo termico è stato escluso in quanto questa tipologia d'impianto è maggiormente adatta ad impianti molto grandi, la cui produzione giornaliera di acqua è molto elevata.

Il sistema di desalinizzazione viene alimentato dall'energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico e da un impianto eolico. La scelta di alimentare il sistema di desalinizzazione mediante degli impianti che sfruttano le risorse rinnovabili è stata effettuata in quanto la zona considerata presenta un'elevata disponibilità della risorsa solare ed eolica. È perciò possibile usufruire di tali risorse con beneficio per l'ambiente, rendendo inoltre indipendente la fornitura di energia elettrica dell'impianto dalla produzione degli impianti tradizionali locali, adibiti alla soddisfazione del carico elettrico degli utenti, i quali presentano elevati costi di produzione dell'energia.

Data l'aleatorietà delle risorse rinnovabili è necessaria anche l'installazione di un sistema di accumulo di energia, affinché l'energia che viene prodotta in eccesso possa essere accumulata ed utilizzata successivamente, quando l'energia prodotta dagli impianti di generazione non è sufficiente a soddisfare la richiesta energetica. A tale proposito è stato pensato di utilizzare una batteria.

Oltre alla domanda idrica gli utenti dell'isola richiedono anche energia elettrica, perciò si è pensato di fornire non solo acqua desalinizzata, ma anche elettricità. Però, per non sovradimensionare troppo gli impianti a fonte rinnovabile, è stato considerato anche un motore diesel, che funge da generatore ausiliario di energia elettrica.

Riassumendo l'impianto analizzato è costituito da un impianto eolico, un impianto fotovoltaico, una batteria di accumulo, un inverter per la conversione della corrente continua in corrente alternata, un generatore diesel e un dissalatore ad osmosi inversa, il quale è dotato di un serbatoio per l'accumulo dell'acqua desalinizzata, in modo tale da disaccoppiare la produzione di acqua dalla sua richiesta.

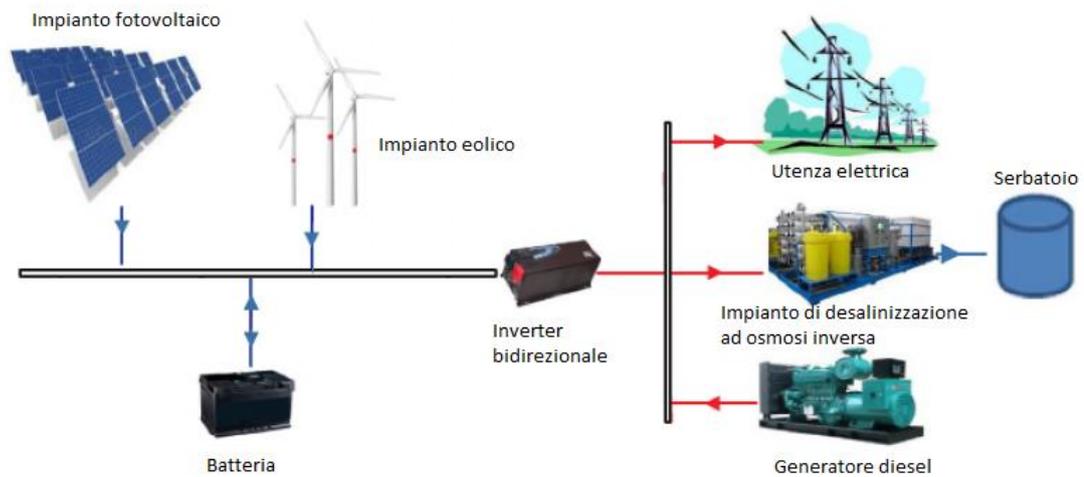


Figura 2.21. Schema d'impianto [14]

2.3 Equazioni del modello

In questo paragrafo vengono riportate le curve dei fabbisogni idrico ed elettrico, che devono essere soddisfatti, e vengono presentate le equazioni che descrivono il funzionamento di ogni componente dell'impianto e la gestione dello stesso.

2.3.1 Domanda idrica

Il calcolo della richiesta oraria di acqua è basato sulla stima del numero di persone presenti sull'isola e del consumo specifico di acqua. La popolazione dell'isola viene suddivisa in due categorie: i residenti, il cui numero è costante durante tutto l'anno, ed i turisti, il cui numero è soggetto a stagionalità e segue la curva di variazione mensile riportata in figura 2.2. Come si può capire dall'osservazione di tale curva la popolazione totale è soggetta ad una forte variabilità stagionale. Infatti nei mesi estivi essa raggiunge fino al doppio della popolazione residente, cosa che determina un forte incremento della domanda di acqua.

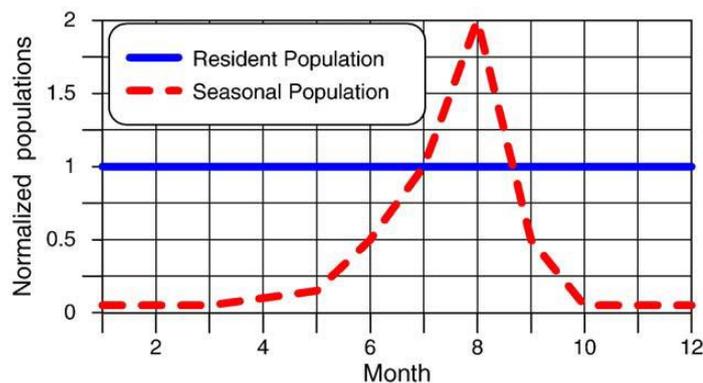


Figura 2.22. Curva di variazione mensile dei residenti e dei turisti [1]

Il consumo specifico giornaliero di acqua varia a seconda della stagione e differisce per le due categorie di popolazione. I dati dei consumi specifici giornalieri di acqua sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 2.2. Consumi specifici giornalieri [1]

Consumo specifico giornaliero di acqua [m ³ /giorno/persona]		
Categoria di popolazione	Inverno	Estate
Residenti	0.15	0.25
Turisti	0.2	0.3

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 [m³/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 [m³/giorno/persona] e S_{WC} è il consumo specifico giornaliero di acqua da parte dei turisti [m³/giorno/persona]. Come già detto 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 2.3, 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.

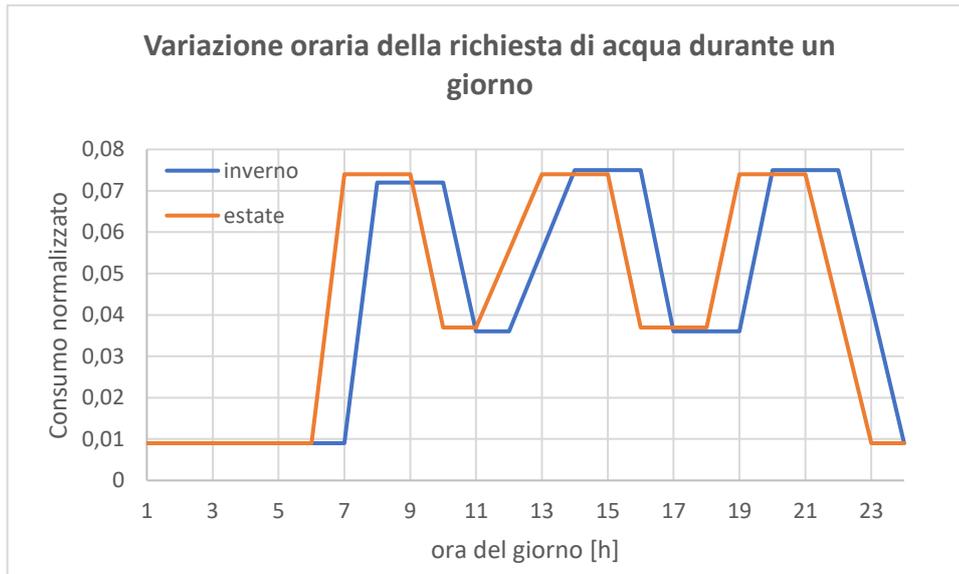


Figura 2.23. Curve orarie normalizzate della domanda di acqua

2.3.2 Fabbisogno elettrico

Gli utenti dell'isola, oltre che della fornitura di acqua potabile, necessitano anche di energia elettrica, pertanto l'impianto considerato, oltre a produrre acqua desalinizzata, produce anche energia elettrica, che viene venduta agli utenti.

Per fornire ad ogni ora del giorno la potenza elettrica necessaria a soddisfare il fabbisogno elettrico degli utenti è necessario conoscere il carico elettrico, il quale è continuamente variabile. Il carico elettrico dipende da vari fattori quali il numero di utenze, la loro tipologia e il mese considerato. La sua stima è stata effettuata utilizzando le curve di carico presenti in [15]. I dati di consumo di energia elettrica riportati per le utenze di tipo civile sono stati ricavati dai risultati del progetto MICENE, uno studio condotto da un gruppo di ricercatori del Politecnico di Milano su un campione di utenze civili nel territorio italiano. Invece per le utenze del settore terziario, essendo questo caratterizzato da una maggiore varietà di utenze, sono stati riportati i valori dei carichi elettrici di utenze rappresentative delle varie tipologie di utenza di questo settore.

Le tipologie di utenze considerate in questa tesi sono quella alberghiera e quella condominiale, con l'ipotesi che i residenti abitino all'interno di condomini, 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 $[\text{kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{giorno})]$, 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 condomini 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 condomini, 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.

2.3.3 Impianto fotovoltaico

L'impianto fotovoltaico converte l'energia solare in energia elettrica, che rappresenta l'alimentazione del dissalatore ad osmosi inversa. In questo paragrafo vengono riportate le equazioni che descrivono il funzionamento di tale impianto e che permettono quindi di calcolare la produzione di potenza elettrica in funzione della disponibilità della risorsa solare [16].

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

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

In questa equazione 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 G_{STC} 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:

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

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

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

$$T_c = T_{aria} + G_t \cdot \frac{NOCT - 20}{800}$$

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 [°C], mentre l'irradianza deve essere espressa in [W/m²].

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.

2.3.4 Impianto eolico

L'impianto eolico converte l'energia del vento in energia elettrica mediante una o più turbine. 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. Per velocità maggiori di essa la potenza viene mantenuta costante, pari a quella nominale, in quanto la turbina eolica è dimensionata per tale valore di potenza e quindi non è in grado di generare valori di potenza superiori ad essa.

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 possiede la propria curva di potenza in funzione della velocità del vento, la quale viene fornita dal costruttore. In letteratura è però possibile trovare delle relazioni che approssimano l'andamento di tale curva come quella riportata di seguito [14]:

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

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

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

Il termine $P_{1,WT}$ indica la potenza elettrica prodotta da una singola turbina dato un valore generico di 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 10m. Tuttavia, ai fini del calcolo della potenza, la velocità del vento deve essere riferita all'altezza del mozzo della turbina eolica (Z), essendo questa l'altezza alla quale l'energia eolica viene convertita in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. 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. Per poter calcolare la velocità del vento all'altezza desiderata si applica la seguente relazione empirica:

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

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 η_{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:

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

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

Le variabili caratteristiche della turbina eolica sono: $P_{1,WT,inst}$, V_{cut-in} , $V_{cut-out}$, V_{nom} , Z . 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.

2.3.5 Batteria

Il sistema di stoccaggio dell'energia che viene utilizzato è un sistema di batterie, quindi un accumulo di tipo elettrochimico. Le batterie si caricano assorbendo la potenza in eccesso prodotta dall'impianto eolico e fotovoltaico e si scaricano cedendo potenza quando la richiesta è maggiore della produzione dei due impianti che utilizzano le risorse rinnovabili.

Le equazioni che descrivono la carica e la scarica della batteria sono le seguenti [14]:

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

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

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 a 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.

Le variabili caratteristiche della batteria sono: η_{carica} , $\eta_{scarica}$, DOD, $E_{batt,nom}$. Il numero di batterie N_{batt} dipende dalla capacità totale del sistema di batterie che si vuole installare. Le potenze di carica e di scarica della batteria, invece, dipendono dagli altri componenti

del sistema. Infine l'energia contenuta nella batteria rappresenta l'output di questo componente.

2.3.6 Generatore diesel

Il generatore diesel viene utilizzato come sistema ausiliario per la generazione di potenza elettrica. Per questo componente sono state considerate due diverse modalità di gestione. La prima consiste nell'avviamento del generatore quando il carico elettrico non può essere soddisfatto completamente dalla potenza generata dagli impianti a fonte rinnovabile, unitamente all'energia messa a disposizione dalla batteria. In questo caso la potenza mancante per la copertura del carico elettrico viene fornita dal generatore diesel, che quindi lavora a carico variabile. La seconda modalità di gestione, invece, consiste nell'avviare il generatore quando l'energia contenuta nella batteria raggiunge il livello minimo. Il generatore diesel lavora a carico nominale fornendo potenza, insieme agli altri due impianti, sia al carico elettrico sia al dissalatore, mentre l'eccesso di potenza prodotta viene utilizzato per caricare la batteria. Il generatore termina di funzionare quando la batteria raggiunge il massimo livello di carica. Poiché il generatore diesel genera potenza in corrente alternata, mentre la batteria necessita di corrente continua, è necessario l'utilizzo di un converter o di un inverter bidirezionale.

Qualunque sia la gestione, 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 [14].

2.3.7 Impianto di desalinizzazione

Come detto precedentemente, la tecnologia adottata per la desalinizzazione dell'acqua è l'osmosi inversa. Prima della desalinizzazione è necessario il pretrattamento dell'acqua, ma questo processo viene trascurato in questa tesi, come pure il post-trattamento, in quanto tali processi non sono oggetto di questo studio.

La configurazione impiantistica adottata è quella in cui più pressure 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. La portata di permeato di ogni vessel si unisce a quella degli altri, così come la portata di concentrato, che quindi fluisce attraverso il sistema di recupero dell'energia, riducendo la potenza assorbita dalla pompa.

Poiché tutti i vessel lavorano in maniera uguale, vengono riportate le equazioni presenti in [17], che descrivono il funzionamento di uno solo di essi.

Il flusso di permeato $Q_{p,i}$ [m^3/h] prodotto in un vessel dipende dalla differenza tra la pressione esercitata sul lato della membrana in cui fluisce l'acqua di alimentazione e la pressione osmotica, la quale si oppone al flusso del permeato che fluisce attraverso la membrana stessa. Tale flusso viene descritto dalla seguente equazione:

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

dove A_{perm} [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ h bar})$] è la permeabilità della membrana all'acqua, S_e [m^2] rappresenta 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:

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

Il termine FF è il fattore di sporramento, 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 empirica:

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

dove $Q_{c,i}$ e $Q_{f,i}$ [m^3/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 empirica:

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

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

$$Y = \frac{Q_{p,i}}{Q_{f,i}}$$

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} [$m^3/(m^2 \text{ h})$] 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 incompressibile 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:

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

Tale consumo è proporzionale alla portata di permeato prodotta: maggiore è la portata, maggiore è il consumo di energia. Un impianto di desalinizzazione dotato di un sistema per il recupero dell'energia generalmente presenta un consumo medio di circa 3 kWh/m³. Poiché la potenza rinnovabile non è costante, l'impianto di desalinizzazione viene fatto lavorare a carico variabile. La strategia operativa scelta è quella di mantenere costante il recovery ratio, variando la pressione e la portata di alimentazione, in quanto, come riportato nell'articolo [18], questa è la strategia che consente di minimizzare il consumo di energia da parte dell'impianto. Dunque, quando la potenza assorbita dall'impianto aumenta, la pressione e la portata di alimentazione aumentano in modo da mantenere costante il rapporto tra la portata d'acqua prodotta e quella di alimentazione. La variazione della portata di alimentazione è resa possibile dal fatto che la pompa è a numero di giri variabile: ad una velocità di rotazione maggiore corrisponde una maggiore potenza assorbita e perciò una maggiore portata d'acqua elaborata.

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.

Le variabili di input dell'impianto di desalinizzazione sono la potenza assorbita, che viene messa a disposizione degli impianti di produzione e dalla batteria, le variabili climatiche, quali la temperatura e la concentrazione salina dell'acqua di mare, e infine tutte le variabili che caratterizzano l'impianto e le sue prestazioni, le quali vengono fissate una volta scelto il dissalatore. Queste sono la permeabilità della membrana all'acqua e al sale, il numero di membrane (sia in serie sia in parallelo), il recovery ratio, i rendimenti della pompa di alta pressione e del sistema di recupero dell'energia, la potenza nominale e quella minima. Gli output, invece, sono la portata di permeato prodotta e il consumo specifico.

2.3.8 Serbatoio di accumulo

Dopo il dissalatore è collocato il serbatoio di accumulo di volume V_{tc} [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. Solamente il volume del serbatoio V_{tc} è caratteristico del componente, le altre variabili sono invece definite dagli altri componenti del sistema.

2.3.9 Strategia operativa dell'impianto

Per il funzionamento di tutto l'impianto è necessario imporre una certa strategia operativa. In questa tesi sono state considerate due strategie operative, le quali differiscono per la modalità di gestione del generatore diesel.

La prima strategia operativa, analoga a quella riportata in [1], viene rappresentata dal diagramma di flusso di figura 2.4 e 2.5. 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 dagli impianti eolico e fotovoltaico (P_{RES}) viene innanzitutto utilizzata per la produzione di acqua desalinizzata, successivamente 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 ($P_{eccesso}$), essa viene utilizzata per caricare la batteria parzialmente oppure totalmente. In quest'ultimo caso se, dopo aver caricato la batteria, è disponibile ancora della potenza in eccesso, 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 che perciò non coperta viene soddisfatta dal generatore diesel.

È importante sottolineare che nel funzionamento dell'impianto vengono rispettati i vincoli dei vari componenti che sono stati descritti precedentemente, cioè i vincoli relativi al serbatoio, alla batteria e al dissalatore.

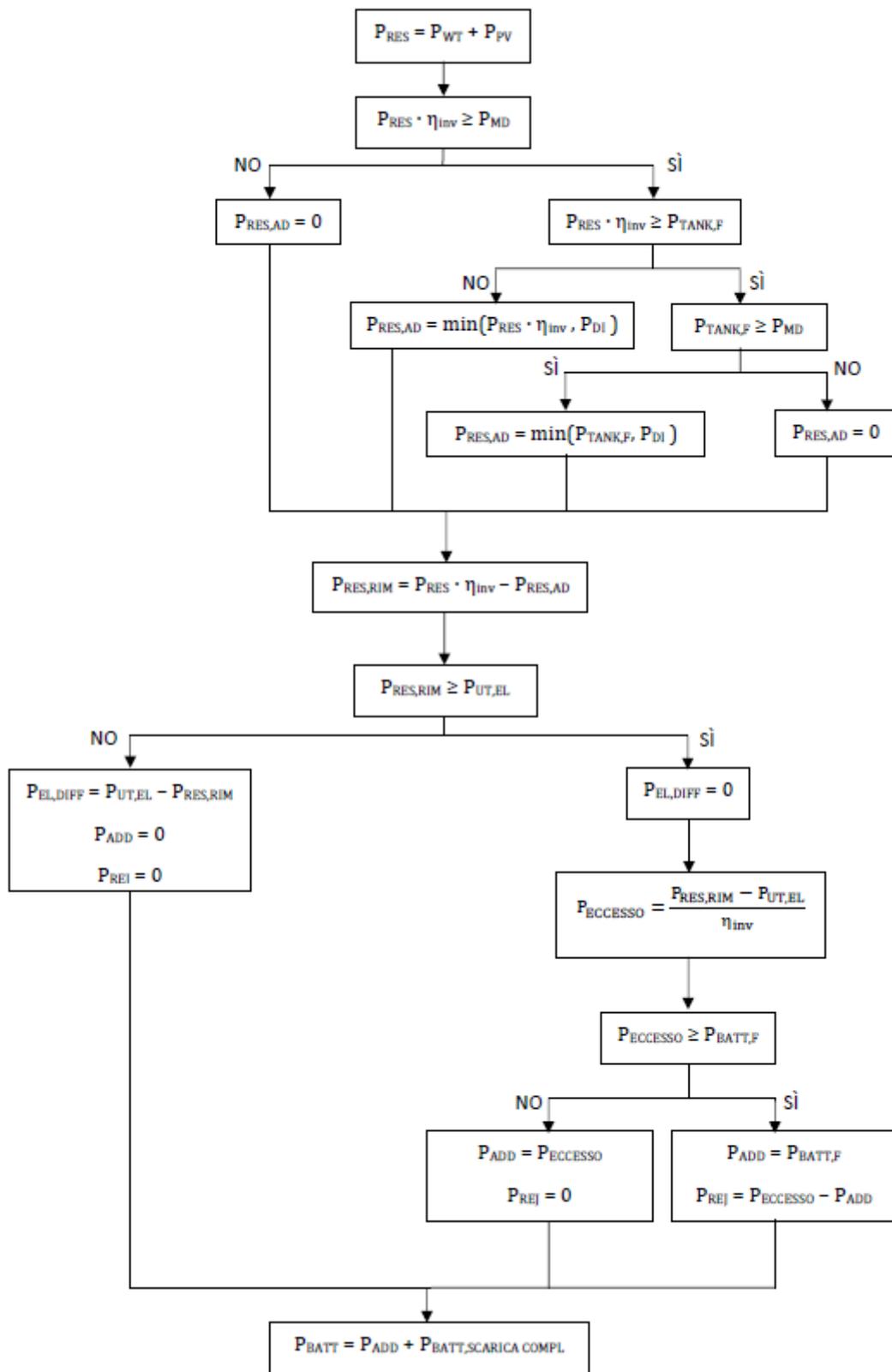


Figura 2.24. Diagramma di flusso della gestione della potenza prodotta dagli impianti a fonte rinnovabile

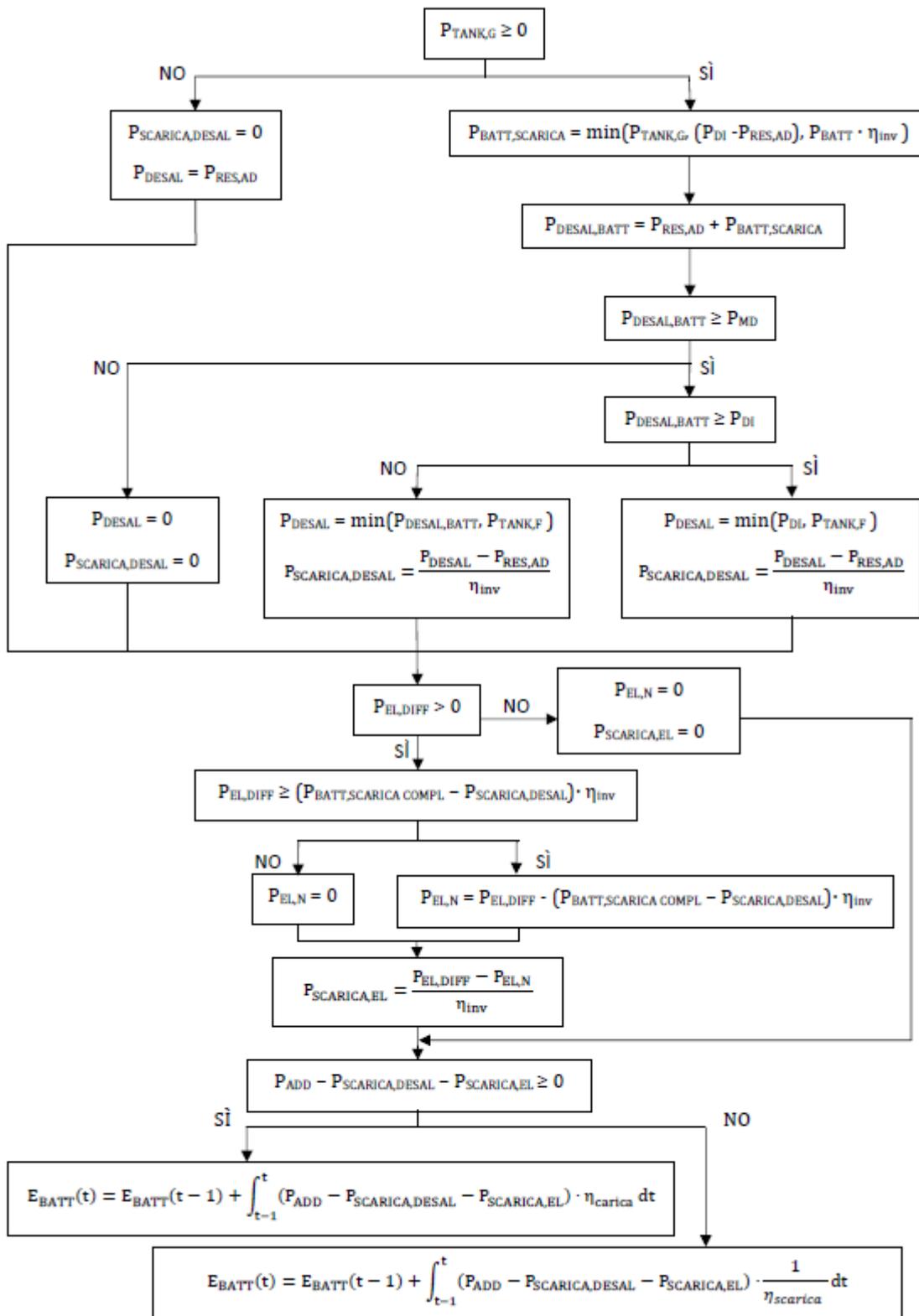


Figura 2.25. Diagramma di flusso della gestione della batteria

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

- $P_{\text{batt,scarica_compl}}$: 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.
- $P_{\text{batt,f}}$: è la potenza per caricare completamente la batteria nell'intervallo di tempo considerato..
- $P_{\text{tank,f}}$: è la potenza necessaria per produrre nell'intervallo di tempo considerato la portata di acqua necessaria a riempire completamente il serbatoio.
- $P_{\text{tank,g}}$: 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

La seconda strategia operativa, che segue quanto viene riportato in [19], è analoga alla precedente, ad eccezione della modalità di gestione del generatore diesel. Infatti, come già detto nel paragrafo 2.3.6, il generatore diesel in questo caso entra in funzione quando l'energia della batteria raggiunge il valore minimo. Operando in condizioni di funzionamento nominali, esso fornisce la potenza prodotta sia al carico elettrico sia all'impianto di desalinizzazione, insieme agli altri impianti di produzione, mentre l'eccesso di potenza viene utilizzato per caricare la batteria. Infine il generatore termina di funzionare quando la batteria viene caricata completamente. Di seguito viene riportato solamente il diagramma della gestione del generatore diesel, in quanto la parte di gestione degli impianti a fonte rinnovabile e della batteria è uguale a quella della strategia precedente.

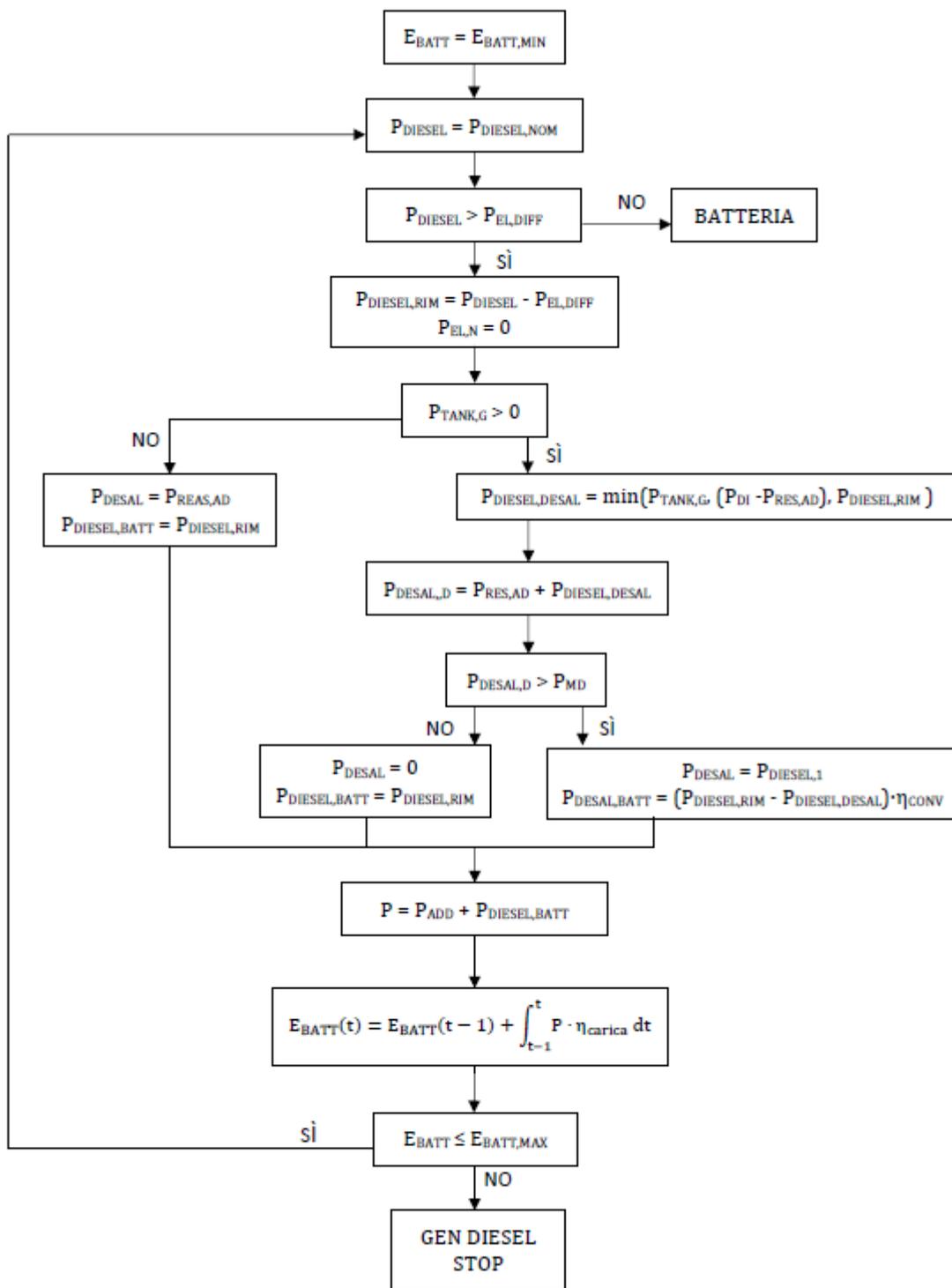


Figura 2.26. Diagramma di flusso della gestione del generatore diesel

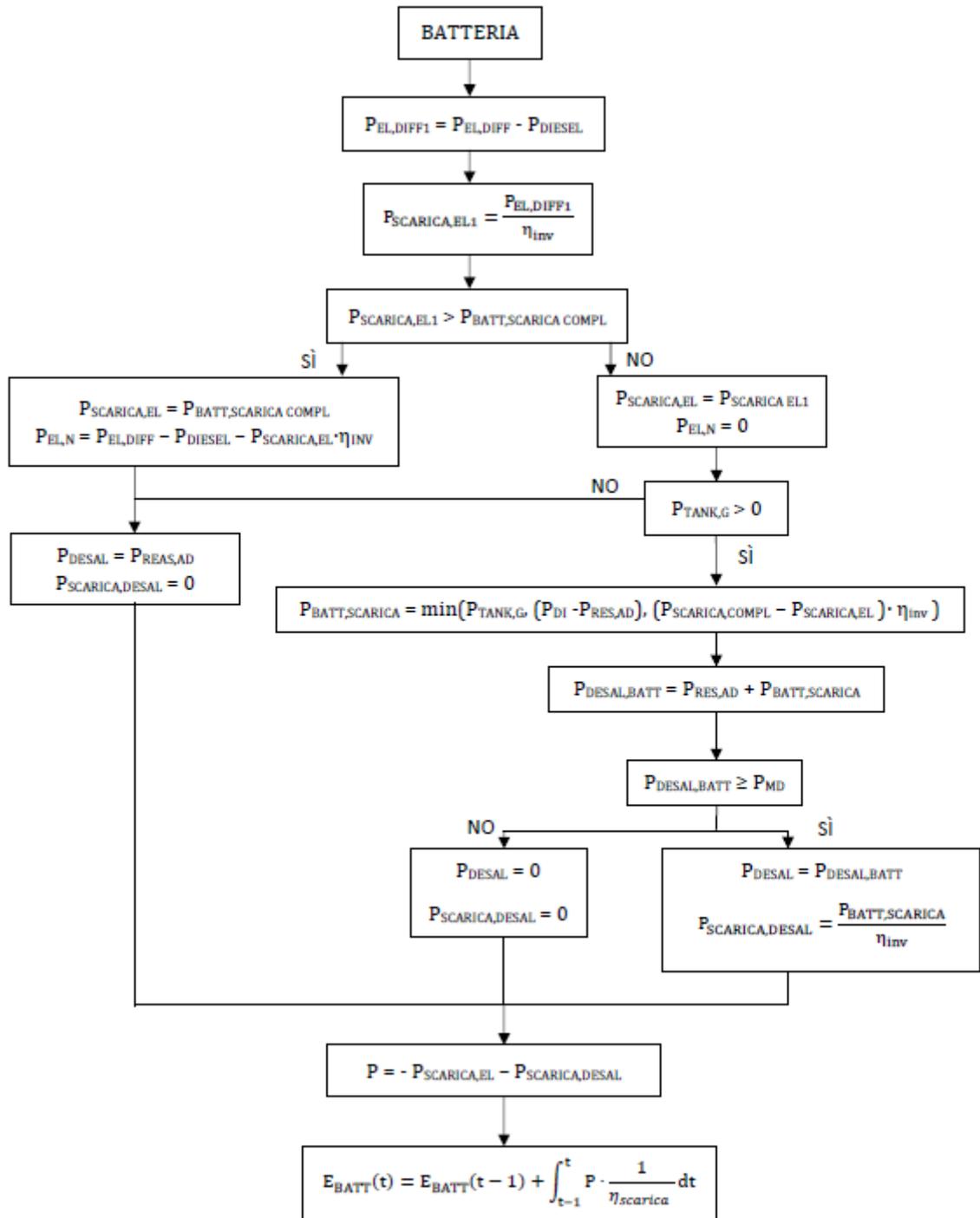


Figura 2.27. Diagramma di flusso della gestione della batteria quando è in funzione il generatore diesel

2.4 Dati climatici

Poiché la simulazione dinamica dell'impianto viene effettuata ora per ora durante un anno, è necessario conoscere i valori orari delle variabili climatiche considerate. Pertanto si utilizza il Test Reference Year (TRY), cioè una sequenza di 8760 valori delle variabili climatiche considerate, effettivamente registrati durante un periodo di tempo della durata di almeno 10 anni.

Dovendo riferirsi ad una determinata isola per poter disporre dei dati climatici, è stato scelto di riferirsi all'isola di Milos, in quanto presenta una popolazione di circa 5000 abitanti e perciò la domanda idrica non è molto elevata. L'isola quindi risulta adatta all'installazione di un impianto come quello oggetto di studio di questa tesi, pensato per taglie non troppo grandi.

I valori orari di un anno tipico delle variabili climatiche considerate, sono quelli registrati presso la stazione meteorologica dell'isola di Milos, disponibili al sito [20].

Le variabili climatiche necessarie alla simulazione sono la temperatura dell'aria, la velocità del vento e l'irradianza. I dati della radiazione solare che sono disponibili sono l'irradianza diretta, diffusa e globale sul piano orizzontale. Tuttavia per la simulazione sono necessari i dati di irradianza globale sul piano dei moduli fotovoltaici, la cui inclinazione viene assunta pari a 29° , perché, da un'analisi effettuata mediante il software PVGIS [21], essa è per la latitudine considerata l'inclinazione alla quale si ottiene il massimo dell'energia prodotta durante un anno. Dunque i valori di irradianza sul piano inclinato sono stati calcolati mediante un foglio Excel con i dati disponibili, utilizzando il modello di Liu e Jordan, il quale viene descritto in appendice.

Inoltre è necessaria la conoscenza dei valori di temperatura dell'acqua, ma non essendo disponibili nel file in cui sono presenti gli altri dati climatici, sono stati presi i valori di temperatura media mensile disponibili al seguente sito [22]. Poiché essi non sono dei valori orari ma dei valori medi mensili, si è ipotizzato che la temperatura dell'acqua rimanga costante per tutto il mese.

Infine l'ultimo dato riguardante il clima è la concentrazione salina dell'acqua di mare. Non avendo a disposizione dati precisi riguardanti tale variabile è stata assunto un valore caratteristico di concentrazione dell'acqua di mare pari a 35000 mg/L ed è stato mantenuto costante.

2.5 Software utilizzato ed implementazione del modello

Il modello dell'impianto oggetto di studio di questa tesi è stato realizzato in ambiente Matlab-Simulink.

Matlab è un linguaggio di programmazione concepito per il calcolo numerico in cui è possibile analizzare e visualizzare dati, implementare algoritmi e creare modelli.

Simulink è uno dei toolbox di Matlab, ovvero un'interfaccia grafica per la simulazione dinamica. I modelli vengono costruiti nella forma di schemi a blocchi, i quali sono presenti nella libreria di cui Simulink dispone.

Matlab e Simulink sono perfettamente integrati tra loro e ciò permette di includere all'interno dei modelli Simulink degli algoritmi scritti in Matlab e viceversa di analizzare i risultati della simulazione dinamica in Matlab.

L'approccio di Simulink è di tipo sequenziale, il quale prevede la conoscenza degli input di un certo blocco per calcolare gli output dello stesso. Se l'input di un blocco è espresso in funzione dell'output dello stesso blocco e le equazioni presenti sono solamente di tipo algebrico, allora si crea un loop algebrico, che il programma non è in grado di risolvere. Per ovviare a tale problema è necessario rielaborare le equazioni in modo tale da eliminare il loop, oppure includere un'equazione differenziale ottenendo quindi un loop differenziale che il programma è in grado di risolvere.

2.5.1 Modello Simulink

Il modello dell'impianto è stato realizzato in ambiente Simulink, basandosi sulle equazioni riportate nel paragrafo 2.3.

Ogni componente del sistema all'interno del modello è rappresentato per mezzo di un subsystem, con le variabili di input in ingresso e gli output in uscita. Nella tabella seguente vengono elencati gli input e gli output di ogni componente del sistema.

Tabella 2.3. Elenco degli input e degli output di ogni componente del sistema

Componente	Input	Output
Impianto fotovoltaico	T_{aria} , G_t , $NOCT$, T_{ref} , β_t , η_{stc} , η_{pt} , N_{PV} , A_m	P_{PV}
Impianto Eolico	V_0 , Z_0 , Z , φ , V_{cut-in} , $V_{cut-out}$, V_{nom} , $P_{1WT,inst}$, N_{WT} , η_{campo_eolico}	P_{WT}
Batteria	$P_{carica/scarica}$, η_{carica} , $\eta_{scarica}$, E_0 , DOD , E_{batt_nom} , N_{batt}	E_{batt} , $P_{batt,scarica_compl}$, P_{batt_f}
Generatore diesel	A , B , $P_{diesel,nom}$, P_{diesel}	F_G
Sistema di controllo e inverter	P_{RES} , $P_{ut,el}$, η_{inv} , $P_{batt,scarica_compl}$, P_{batt_f} , P_{DI} , P_{MD} , P_{tank_f} , P_{tank_g}	P_{el_N} , P_{REI} , P_{desal} , P_{RES_AD} , $P_{carica/scarica}$
Impianto di desalinizzazione	T_{acqua} , P_{desal} , A_p , B_{salt} , S_e , n_e , n_v , FF , P_p , Y , C_f , η_{hpp} , η_{erd}	Q_p , consumo
Serbatoio	Q_p , Q_{dem} , V_{tank_0} , V_{tc} , F_{Vtg} , T_{acqua} , A_p , B_{salt} , S_e , n_e , n_v , FF , P_p , Y , C_f , η_{hpp} , η_{erd}	V_{tank} , P_{tank_f} , P_{tank_g}

All'interno del subsystem che rappresenta il serbatoio sono presenti come input anche le variabili che caratterizzano la membrana e gli altri componenti dell'impianto di

desalinizzazione, perché esse sono necessarie per calcolare la potenza elettrica che dovrebbe essere messa a disposizione per riempire il serbatoio completamente o fino al 90%.

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 come un output 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 e con questi valori è possibile calcolare il consumo specifico, che deve essere mediamente di circa 3 kWh/m^3 .

Tuttavia nell'articolo [1], 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. In questo modo è possibile effettuare un confronto migliore tra i risultati ottenuti nell'articolo [1] e quelli dei due modelli Simulink realizzati, osservando le rispettive differenze.

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".

2.5.2 Codice Matlab

In ambiente Matlab sono stati creati i file contenenti tutti i dati di ingresso del modello realizzato con Simulink e il file utilizzato per lanciare la simulazione ed analizzare i risultati ottenuti.

I valori delle variabili climatiche quali irradianza sul piano inclinato, velocità del vento, temperatura dell'aria e temperatura dell'acqua sono stati inseriti come vettori colonna all'interno dell'm-file denominato "dati_clima".

Il profilo orario del fabbisogno idrico è stato realizzato utilizzando una function, denominata "acqua_desal", che richiede in ingresso il numero di residenti e calcola con le equazioni viste al paragrafo 2.3.1 il profilo orario del fabbisogno idrico durante un intero anno.

Analogamente il profilo orario del fabbisogno elettrico è stato realizzato mediante la function chiamata "carico_el".

All'interno dello script Matlab "dati_ingresso_impianto" è stato specificato il numero di residenti dell'isola, sono quindi state chiamate le funzioni "acqua_desal" e "carico_el" per il calcolo degli andamenti orari dei fabbisogni e sono stati inseriti i valori delle taglie dei componenti dell'impianto e di tutte le altre variabili indipendenti, che dipendono dalle loro caratteristiche e prestazioni.

Infine è stato realizzato lo script "impianto" in cui sono stati richiamati tutti i dati di ingresso riportati negli altri m-file, è stato lanciato Simulink per effettuare la simulazione e sono stati analizzati i risultati ottenuti, calcolando degli indici tecnici ed economici, i quali vengono descritti nei successivi paragrafi.

2.6 Indici tecnici

Di seguito vengono riportati gli indici tecnici, descritti nell'articolo [1], 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 e il volume totale di acqua che in un anno viene richiesto dagli utenti:

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

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

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

- *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:

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

- *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 del 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:

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

Questo indicatore viene calcolato solamente per la configurazione d'impianto che utilizza il generatore diesel solamente per soddisfare il carico elettrico.

- *Numero di ore di funzionamento del generatore diesel*, utile per capire quante ore all'anno lavora il generatore.
- *Numero di accensioni del generatore diesel*, utile per conoscere quante volte il generatore viene avviato. È preferibile che tale parametro non sia troppo elevato, in quanto un numero eccessivo di avviamenti potrebbe danneggiare il generatore.
- *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:*

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

- *Fattore di capacità del generatore diesel:*

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

2.7 Indici economici

In questo paragrafo vengono riportate le relazioni per il calcolo dei costi di produzione dell'acqua desalinizzata e dell'energia, necessari per una prima valutazione della fattibilità dell'impianto.

Per calcolare questi costi 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 [1], 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 [14], 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 [23], e sono le seguenti:

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

$$OM_{inv} = 20$$

Generatore diesel

Le equazioni relative ai costi di tale impianto sono state ricavate dall'articolo [14], 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 in Grecia è di circa 1.16 €/L [24] e V_{fuel} è il totale volume di combustibile consumato in un anno, il quale è espresso in [L/anno].

Impianto di desalinizzazione e serbatoio di accumulo

Le equazioni relative ai costi di tale impianto sono state ricavate dall'articolo [1], 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 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. Per le configurazioni d'impianto in cui il generatore diesel alimenta solamente il carico elettrico, i costi relativi al generatore vengono imputati solamente al carico elettrico e non all'acqua desalinizzata.

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

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

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

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

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.

Nelle configurazioni in cui il generatore diesel soddisfa il carico elettrico ed alimenta anche l'impianto di desalinizzazione, i costi di tale componente devono essere attribuiti sia all'acqua desalinizzata sia all'energia elettrica. I costi di produzione dell'acqua e dell'energia sono perciò:

$$W_{cost} = \frac{[IC_{tot} \cdot f_a + OM_{tot} + FC] \cdot F_{des} + IC_{des} \cdot f_a + OM_{des}}{W_{AP}}$$

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

$$E_{cost} = \frac{[IC_{tot} \cdot f_a + OM_{tot} + FC] \cdot F_{el}}{E_{el}}$$

$$F_{el} = \frac{E_{el}}{E_{desal} + E_{el}}$$

$$IC_{tot} = IC_{wt} + IC_{pv} + IC_{inv} + IC_{bat} + IC_{diesel}$$

$$OM_{tot} = OM_{wt} + OM_{pv} + OM_{inv} + OM_{diesel}$$

Capitolo III

Configurazioni d'impianto

In questo capitolo viene analizzato il funzionamento di diverse configurazioni d'impianto, osservando i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate e valutandoli attraverso gli indicatori tecnici ed economici descritti nel precedente capitolo.

3.1 Configurazione iniziale

La prima configurazione impiantistica studiata è riportata nell'articolo [1], che è stato preso come riferimento per la costruzione del modello. Questa scelta è stata fatta in quanto è necessario verificare la validità del modello realizzato, confrontando i risultati della simulazione con quelli del sistema preso a riferimento. Al fine di effettuare tale confronto si deve considerare la medesima configurazione impiantistica ed inserire gli stessi dati di input, perciò le taglie dei componenti che vengono utilizzate sono uguali a quelle riportate nell'articolo [1].

In questa prima configurazione il sistema è costituito da un impianto fotovoltaico, un impianto eolico, una batteria, un inverter, un dissalatore, un serbatoio e delle utenze che richiedono acqua desalinizzata. Non vengono considerati né il carico elettrico né il generatore diesel. Le taglie dei vari componenti sono scelte in base alla richiesta di acqua desalinizzata, determinata dal numero dei residenti, fissato pari a 5000. Di seguito viene riportato il dimensionamento dell'impianto.

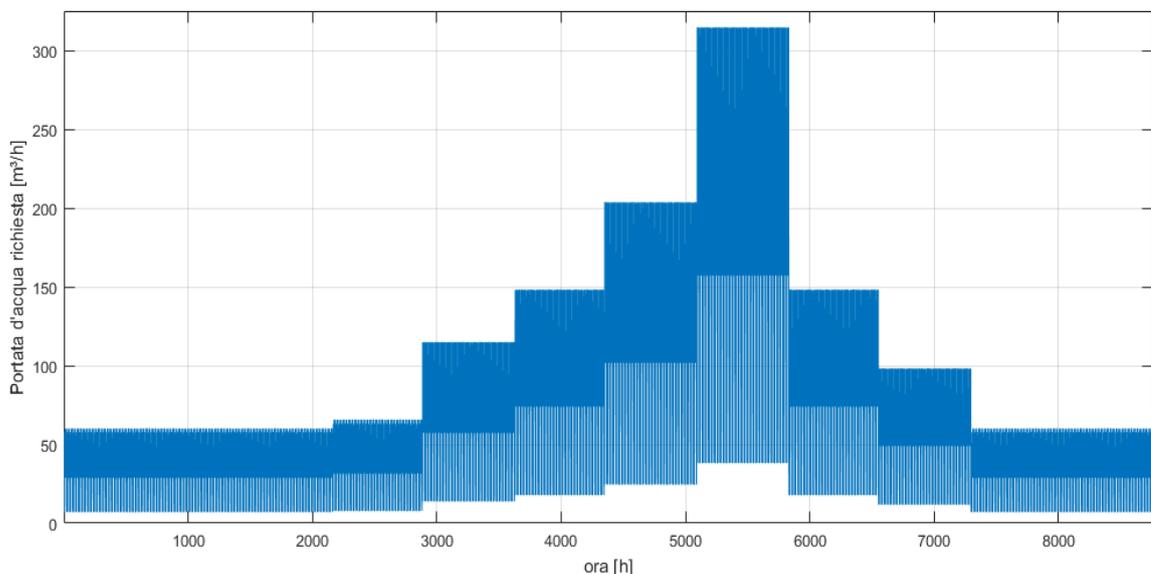


Figura 3.28. Andamento della domanda d'acqua

3.1.1 Impianto di desalinizzazione

L'impianto di desalinizzazione non necessita di una potenza nominale pari al valore massimo di portata d'acqua richiesta, in quanto è presente un serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua. Pertanto la potenza installata dell'impianto viene scelta in modo tale che esso sia in grado di fornire una portata d'acqua pari al consumo orario medio annuo. Tale valore è assunto pari a 160 m³/h: considerando un consumo medio di 3 kWh/m³, la potenza installata del dissalatore è di 480 kW.

Le caratteristiche dell'impianto di desalinizzazione vengono riassunte in tabella 3.1.

Tabella 3.4. Dati dell'impianto di desalinizzazione

Dissalatore ad osmosi inversa		
Potenza nominale	P_{DI} [kW]	480
Potenza minima	P_{MD} [kW]	120
Numero di membrane per recipiente	n_e	7
Numero di recipienti in pressione	n_v	42
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 sporcamento	FF [%]	90
Rendimento della pompa di alta pressione	η_{HPP} [%]	80
Rendimento del sistema di recupero	η_{ERD} [%]	90

La potenza minima è stata fissata pari al 25% di quella nominale, come in [1], i valori di permeabilità della membrana e del rendimento della pompa vengono assunti come in [17], il numero di membrane e di recipienti in pressione vengono assunti utilizzando come riferimento il dissalatore MSW-300N riportato in [25].

3.1.2 Serbatoio di stoccaggio

Per il dimensionamento del serbatoio di accumulo si considera che l'impianto debba avere un'autonomia di fornitura di acqua pari a due giorni del periodo estivo, quindi il volume del serbatoio che viene considerato è 8500 m³.

3.1.3 Impianto fotovoltaico ed impianto eolico

A causa dell'aleatorietà delle risorse rinnovabili si è deciso che la potenza installata totale dei due impianti di alimentazione (eolico e fotovoltaico) debba essere circa pari al doppio della potenza installata del dissalatore, in modo tale che possa esserci un eccesso di produzione per poter caricare la batteria. Si è scelto di suddividere la potenza installata

dei due impianti nel seguente modo: 800 kW per l'impianto eolico e 200 kW per l'impianto fotovoltaico.

Il modello di turbina eolica scelto è DDIS60 del produttore DDIS e presenta le seguenti caratteristiche:

Tabella 3.2. Dati della turbina eolica [26]

Turbina eolica DDIS60		
Potenza nominale	P_{nom} [kW]	800
Velocità nominale	V_{nom} [m/s]	10.3
Velocità di cut-in	V_{cut-in} [m/s]	3
Velocità di cut-out	$V_{cut-out}$ [m/s]	20
Altezza del mozzo	Z [m]	60

La potenza nominale di una singola turbina eolica è uguale a quella totale da installare, quindi il numero di turbine N_{WT} risulta pari a 1, perciò in questo caso il rendimento del campo eolico è unitario, non essendo presenti altre turbine che possano interferire con essa.

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

Tabella 3.3. Dati del modulo fotovoltaico [27]

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

Per ottenere un impianto fotovoltaico di potenza installata totale pari a 200 kW, è necessario installare 625 moduli. Il rendimento del sistema MPPT non è indicato nella scheda tecnica e quindi è stato fissato pari a 1.

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%.

3.1.4 Batteria di accumulo

Per il dimensionamento della batteria di accumulo si è considerato che essa debba possedere una capacità tale da fornire al dissalatore l'energia necessaria alla produzione continua di acqua a carico nominale per tre giorni consecutivi, senza la fornitura di

energia da parte degli impianti a fonte rinnovabile. Poiché la potenza nominale del dissalatore è di 480 kW, l'energia consumata da esso per il funzionamento continuo di tre giorni è di 34560 kWh. Considerando una profondità di scarica di circa 80%, la capacità nominale del sistema di batterie è di circa 44000 kWh.

Il rendimento di carica della batteria è stato assunto pari a 0.7, mentre il rendimento di scarica è stato considerato unitario.

3.1.5 Risultati modello 1

Di seguito vengono riportati gli andamenti orari delle variabili che caratterizzano il funzionamento dell'impianto per una settimana tipica invernale ed una estiva, ottenuti con il modello Simulink in cui si assume per il dissalatore un consumo costante pari a 3 kWh/m³.

Funzionamento invernale

Come si può osservare dal primo grafico di figura 3.2, nel funzionamento invernale la maggior parte della potenza prodotta proviene dall'impianto eolico, anche perché esso possiede una maggiore potenza installata rispetto all'impianto fotovoltaico. La batteria fornisce solamente una piccola quantità di energia. Ciò avviene in corrispondenza del primo periodo di assenza di produzione dell'impianto eolico, in quanto il fotovoltaico, avendo una potenza nominale di 200 kW, non è in grado di produrre da solo una potenza tale da permettere il funzionamento dell'impianto di desalinizzazione, il quale entra in funzione solo quando la potenza è maggiore del valore minimo, che è di 120 kW.

La produzione di acqua, nelle ore diurne, è quasi contemporanea alla richiesta. In corrispondenza del primo periodo di assenza di produzione da parte della turbina eolica, la produzione è nulla e il livello del serbatoio inizia a calare (quarto grafico di figura 3.2), finché non entra in funzione la batteria, che cerca di riportare il livello del serbatoio al 90%. Successivamente, quando viene fornita nuovamente potenza da parte dell'impianto eolico, la produzione aumenta fino al valore nominale e il serbatoio viene riempito completamente.

Nel successivo periodo di mancata produzione di potenza la domanda viene soddisfatta dall'acqua stoccata nel serbatoio, il cui livello cala ma la batteria non entra in funzione in quanto tale periodo è comunque limitato e il livello del serbatoio non scende sotto il 90%. La portata d'acqua richiesta, essendo bassa, viene sempre soddisfatta completamente dall'impianto di desalinizzazione e in minima parte dal serbatoio, che risulta essere quasi sempre completamente pieno, perciò nel periodo invernale la portata d'acqua non soddisfatta è nulla.

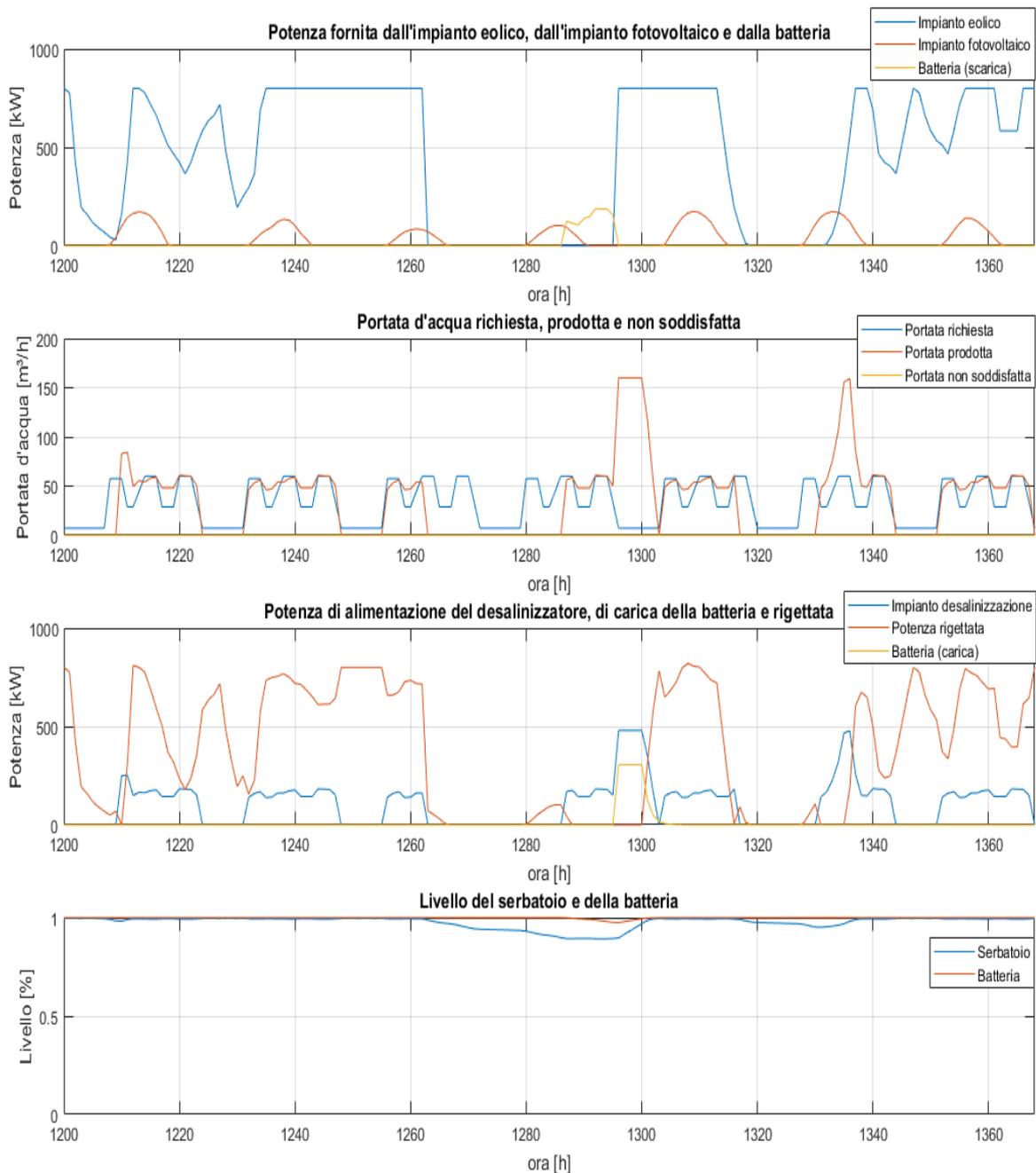


Figura 3.29. Grafici relativi al funzionamento invernale del modello 1

Nel terzo grafico di figura 3.2 si può vedere che molta della potenza prodotta viene rigettata, in quanto, essendo la richiesta nel periodo invernale modesta, 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. La batteria, infatti, fornisce potenza all'impianto di desalinizzazione solamente in un numero limitato di ore (primo grafico di figura 3.2) e nelle ore successive viene caricata riportando il suo livello al valore nominale: solamente in questo caso l'eccesso di potenza prodotta può essere accumulato.

Funzionamento estivo

Nel funzionamento estivo, come si può osservare dal primo grafico di figura 3.3, la batteria fornisce potenza all'impianto di desalinizzazione più frequentemente rispetto al caso invernale. Ciò avviene in corrispondenza delle ore in cui la potenza prodotta da fonte rinnovabile è più bassa. Infatti, poiché la richiesta di acqua è elevata, l'impianto opera sempre in condizione di funzionamento nominale e quando la potenza resa disponibile dagli impianti a fonte rinnovabile non è sufficiente, la batteria viene scaricata per permettere il funzionamento dell'impianto al valore massimo di potenza.

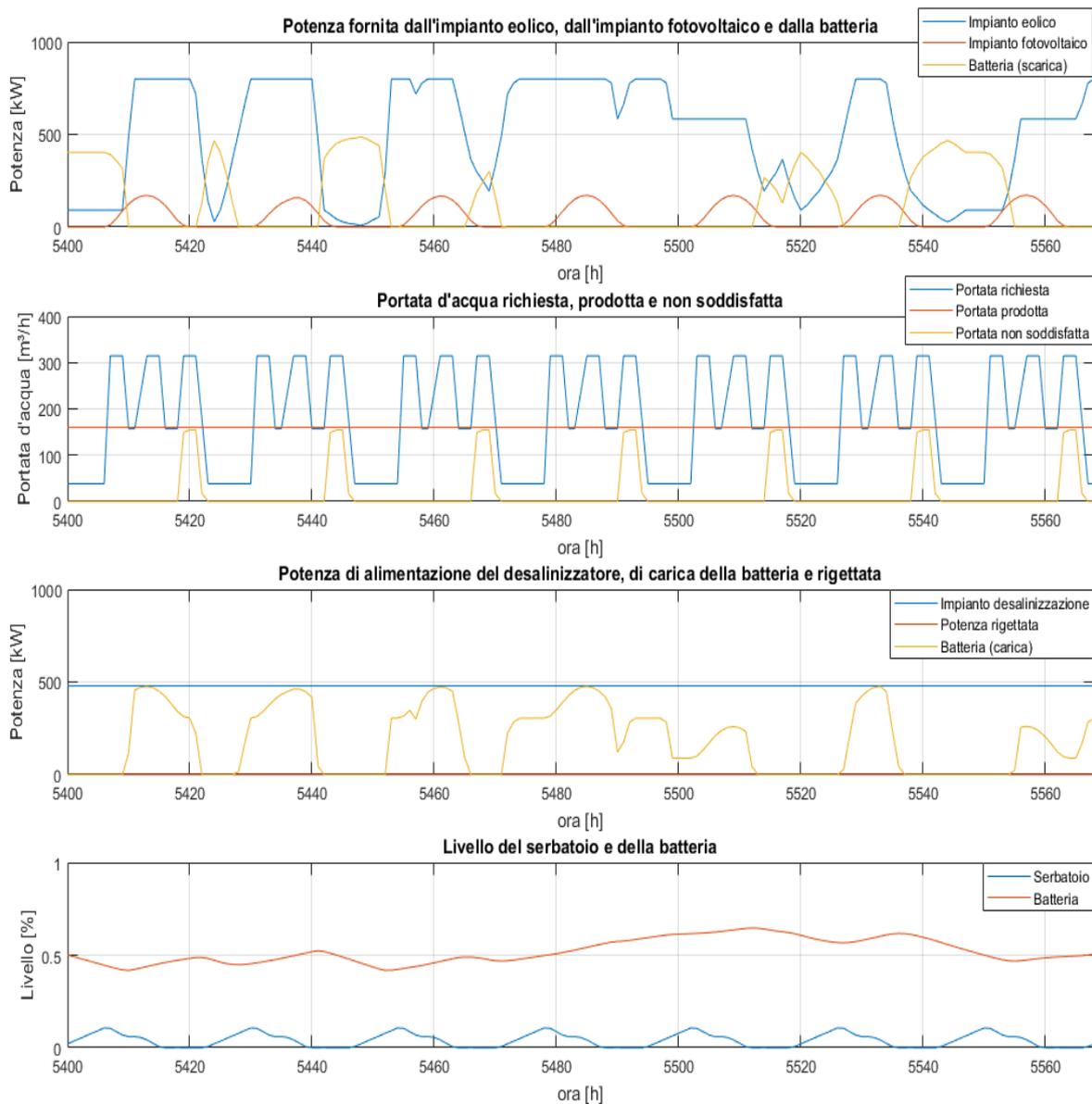


Figura 3.30. Grafici relativi al funzionamento estivo del modello 1

Nonostante l'impianto operi a regime nominale, non tutta la domanda di acqua viene soddisfatta. Infatti la domanda è più elevata della produzione e il serbatoio non è in grado di fornire tutta l'acqua richiesta, perché esso si scarica completamente. Il serbatoio aumenta di livello nelle ore in cui la domanda è più bassa, ma poi si scarica totalmente nelle ore di picco: l'acqua stoccata nella fase di bassa richiesta non è perciò sufficiente a coprire la punta del carico, quindi parte della domanda non può essere soddisfatta (secondo e quarto grafico di figura 3.3).

Nel terzo grafico di figura 3.3 si può osservare l'andamento della potenza di alimentazione dell'impianto di desalinizzazione, della potenza di carica della batteria e della potenza rigettata. Si vede che la batteria si ricarica frequentemente, accumulando l'eccesso di energia che viene prodotta per renderla disponibile successivamente, come si è visto nel primo grafico di figura 3.3. Il livello della batteria è oscillante e mediamente è intorno al 50% (quarto grafico di figura 3.3).

In questo periodo la potenza rigettata all'esterno è nulla in quanto l'eccesso di potenza viene sempre accumulato nella batteria, la quale, non essendo completamente carica e venendo utilizzata spesso, consente lo stoccaggio del surplus di potenza prodotta.

Nella tabella 3.4 si riportano i valori degli indici tecnici ed economici, utilizzati per analizzare i risultati, e vengono confrontati con quelli riportati nell'articolo [1], preso come riferimento per la validazione del modello.

I risultati del modello realizzato in ambiente Simulink sono in linea con quelli del modello oggetto di studio dell'articolo [1]. Le differenze presenti possono essere dovute al fatto che i dati climatici utilizzati non sono esattamente i medesimi. Infatti, ad esempio, il fattore di potenza dell'impianto fotovoltaico è più elevato di quello riportato nell'articolo, probabilmente perché i dati di irradianza globale che sono stati utilizzati in questa tesi sono più elevati di quelli utilizzati dagli autori dell'articolo. Inoltre, nonostante la capacità dei sistemi di stoccaggio dell'energia sia uguale in entrambi i casi, l'energia rigettata all'esterno è leggermente più elevata nel modello Simulink, suggerendo che in questo caso la potenza prodotta dagli impianti sia più elevata.

Anche se nell'articolo viene considerato un sistema di pompaggio idrico anziché la batteria per lo stoccaggio di energia, i valori del tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore sono i medesimi.

La quantità d'acqua totale prodotta in un anno e il tasso di copertura della domanda sono pressoché uguali. Lo scostamento percentuale è di 2.6% per l'acqua prodotta e di 4.2% per il tasso di copertura. Tali valori di scostamento sono ritenuti accettabili, perciò si conclude che il modello è validato.

Infine il costo di produzione dell'acqua è più elevato di quello dell'articolo, in quanto nel modello Simulink è stata considerata una batteria come sistema di stoccaggio dell'energia, che risulta essere più costosa del sistema di pompaggio. Se si impone il costo

della batteria uguale al sistema di pompaggio dell'articolo, il costo di produzione dell'acqua diventa pari a 2.40 €/m³, il quale presenta uno scostamento percentuale di 5.14% con il costo riportato nell'articolo.

Tabella 3.4. Risultati del modello 1

		Simulink	Articolo	Scostamento [%]
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	86.5	90.3	4.2
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	44.4	39.5	12.4
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore	F_batt [%]	17.8	18.1	1.7
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	16.58	13.2	25.6
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	20.76	21.5	3.4
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	502835	516070	2.6
Costo di produzione dell'acqua	W_cost [€/m ³]	3.84	2.53	51.8

3.1.6 Risultati modello 2

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti mediante la simulazione del modello Simulink in cui è stato considerato un consumo specifico variabile dell'impianto di desalinizzazione, realizzato con le equazioni riportate nel paragrafo 2.3.7.

Il consumo specifico in questo modello è variabile con il carico: è minimo quando la potenza assorbita dal dissalatore è minima ed aumenta con il carico; mediamente è di circa 3 kWh/m³.

Gli andamenti orari delle variabili impiantistiche, che si ottengono con questo modello, sono analoghi a quelli che si ottengono considerando un consumo specifico del dissalatore costante e perciò valgono le stesse considerazioni fatte nei paragrafi precedenti. L'unico scostamento che si riscontra tra i due modelli è l'andamento della portata d'acqua prodotta e quello della portata d'acqua non soddisfatta durante il funzionamento estivo. Il motivo di tale differenza risiede nel fatto che nel secondo modello, quando il carico è massimo, il consumo specifico è maggiore di 3 kWh/m³, ovvero è pari a 3.88 kWh/m³. In estate, quando 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, che perciò, anche insieme a quella stoccata nel serbatoio, non è in grado di soddisfare completamente la richiesta. Infatti con il secondo modello si producono circa 29700 m³ d'acqua in meno rispetto al primo modello. Per tale ragione la portata d'acqua non soddisfatta è maggiore di quella che si ottiene considerando per l'impianto di desalinizzazione un consumo specifico costante.

Di seguito vengono riportati i grafici di questi andamenti ed i valori degli indici tecnici relativi al funzionamento dell'impianto, i quali vengono confrontati con quelli riportati nell'articolo [1], come è stato fatto per il modello precedente.

Funzionamento invernale

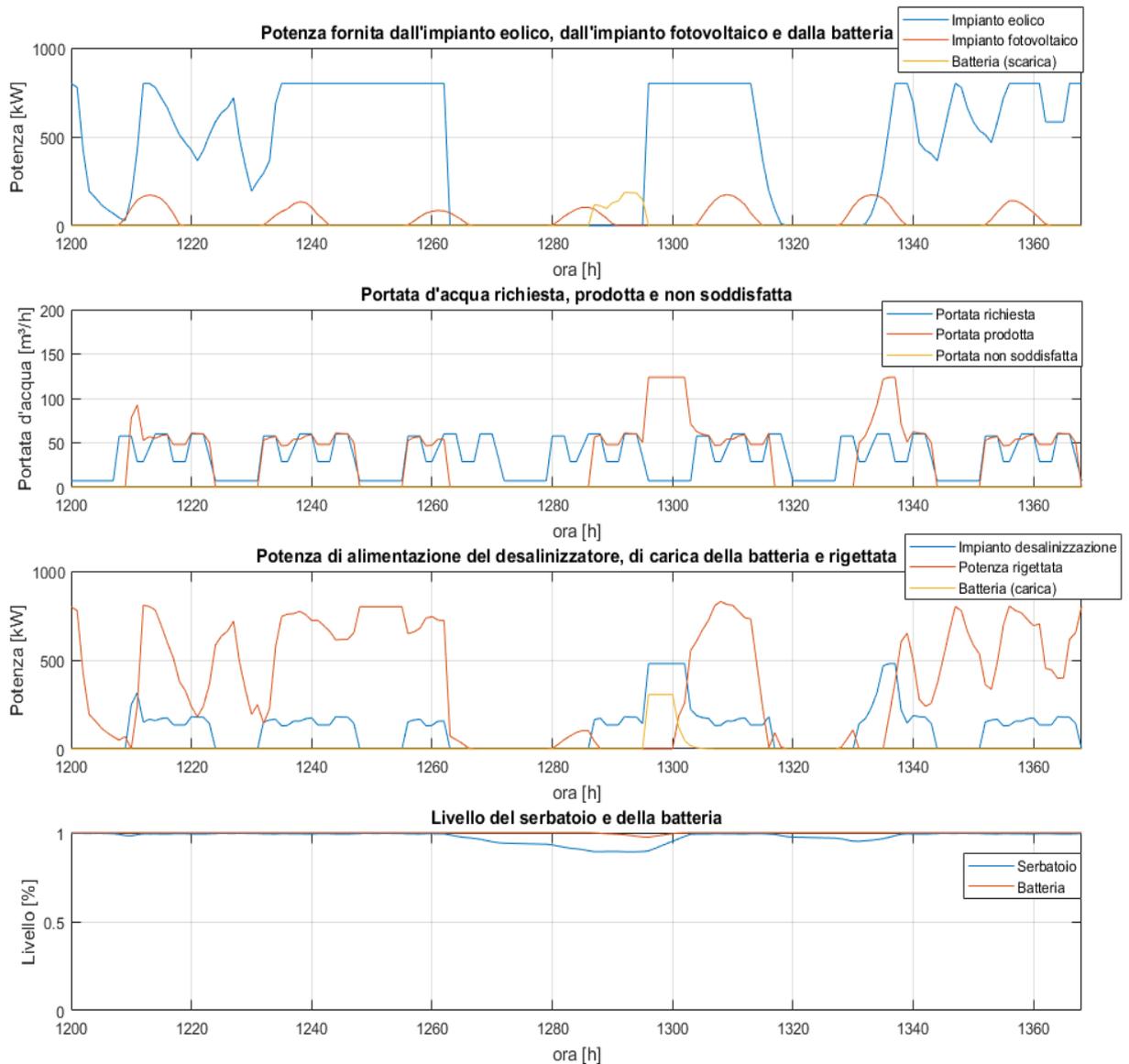


Figura 3.31. Grafici relativi al funzionamento invernale del modello 2

Funzionamento estivo

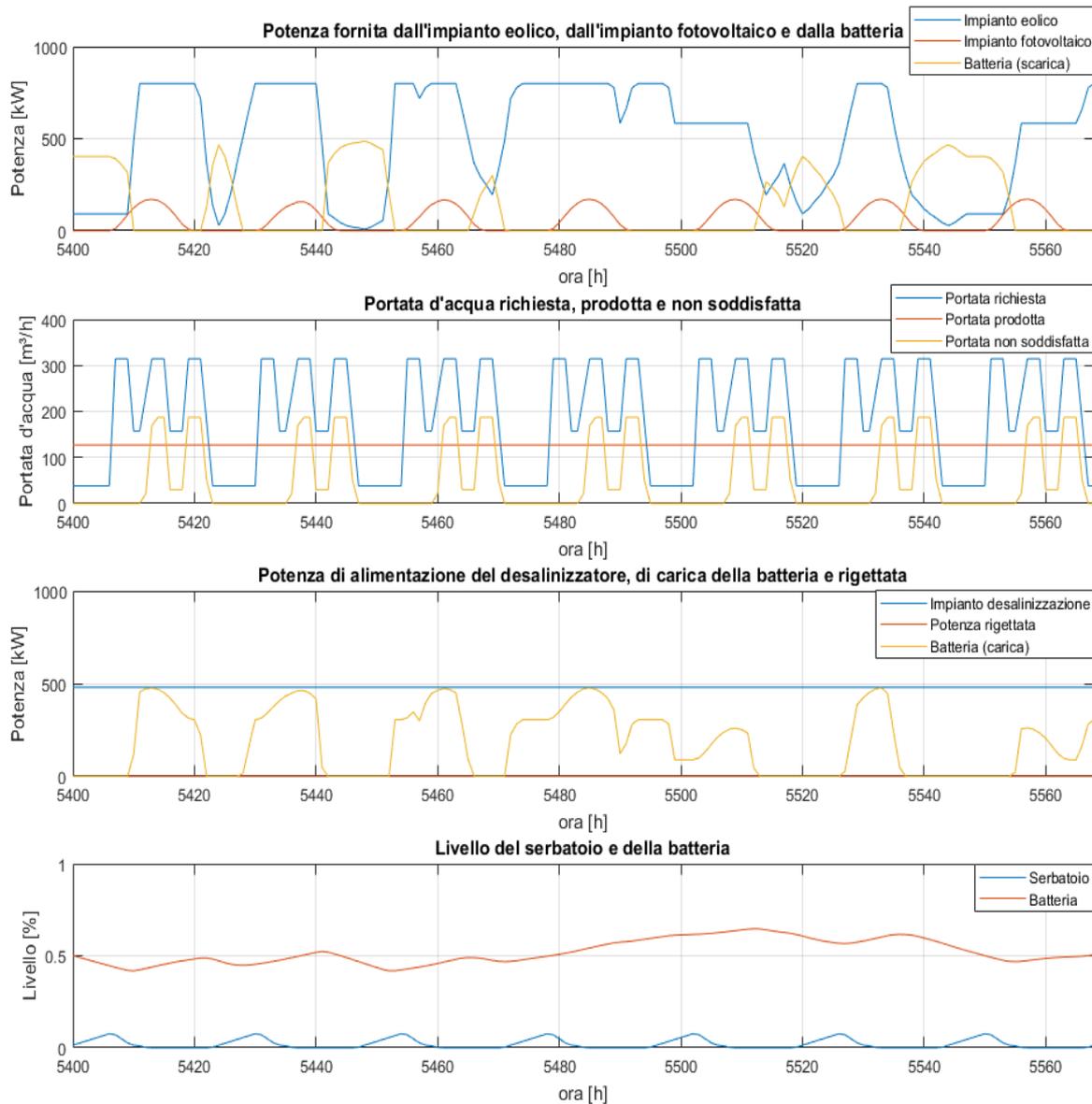


Figura 3.32. Grafici relativi al funzionamento estivo del modello 2

Come si può osservare dalla tabella 3.5 i valori degli indici tecnici sono simili a quelli dell'articolo [1]. Il valore che si discosta maggiormente è il tasso di copertura della domanda di acqua desalinizzata. Come esposto precedentemente questo è dovuto al fatto di aver considerato un consumo specifico del dissalatore variabile con il carico, come avviene nella realtà. Ne consegue che anche la quantità totale di acqua desalinizzata prodotta in un anno è inferiore.

Per ovviare a questo problema dovrebbe essere aumentata la taglia dell'impianto di desalinizzazione oppure il volume del serbatoio di stoccaggio.

Anche se i valori di alcuni indici sono più bassi, i risultati ottenuti con questo modello sono comunque accettabili, anche perché questo modello considerando un consumo

specifico variabile è più aderente alla realtà. Perciò nelle configurazioni successive si considererà sempre tale modello.

Tabella 3.5. Risultati del modello 2

		Simulink	Articolo	Scostamento [%]
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	81.23	90.3	10
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	40.14	39.5	1.6
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore	F_batt [%]	17.1	18.1	5.5
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	17.01	13.2	28.9
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	22.56	21.5	4.9
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	473128	516070	8.3
Costo di produzione dell'acqua	W_cost [€/m ³]	3.94	2.53	55.7

3.1.7 Osservazioni

Come è stato osservato precedentemente, la maggior parte dell'energia rigettata è concentrata nei mesi invernali, quando la domanda idrica è bassa, il serbatoio è quasi sempre completamente pieno e il livello della batteria è pari a quello massimo. In questa situazione la produzione non è molto elevata, a causa della bassa domanda di acqua, e quindi c'è una grande quantità di energia prodotta in eccesso che però non può essere accumulata nella batteria, quando invece essa sarebbe utile in alcuni mesi estivi, durante i quali la produzione di acqua è bassa a causa dell'assenza di potenza generata dalla turbina eolica.

Infatti osservando i grafici di figura 3.6, si vede che la portata richiesta non viene soddisfatta quando la potenza da rinnovabile è bassa ed essendo la batteria scarica non è in grado di fornire all'impianto di desalinizzazione la potenza necessaria per il funzionamento a pieno carico in modo tale da poter coprire la richiesta.

Dunque si può pensare di incrementare la capacità della batteria di accumulo, in modo tale da diminuire la quantità di energia rigettata e contemporaneamente aumentare anche il tasso di copertura della domanda idrica.

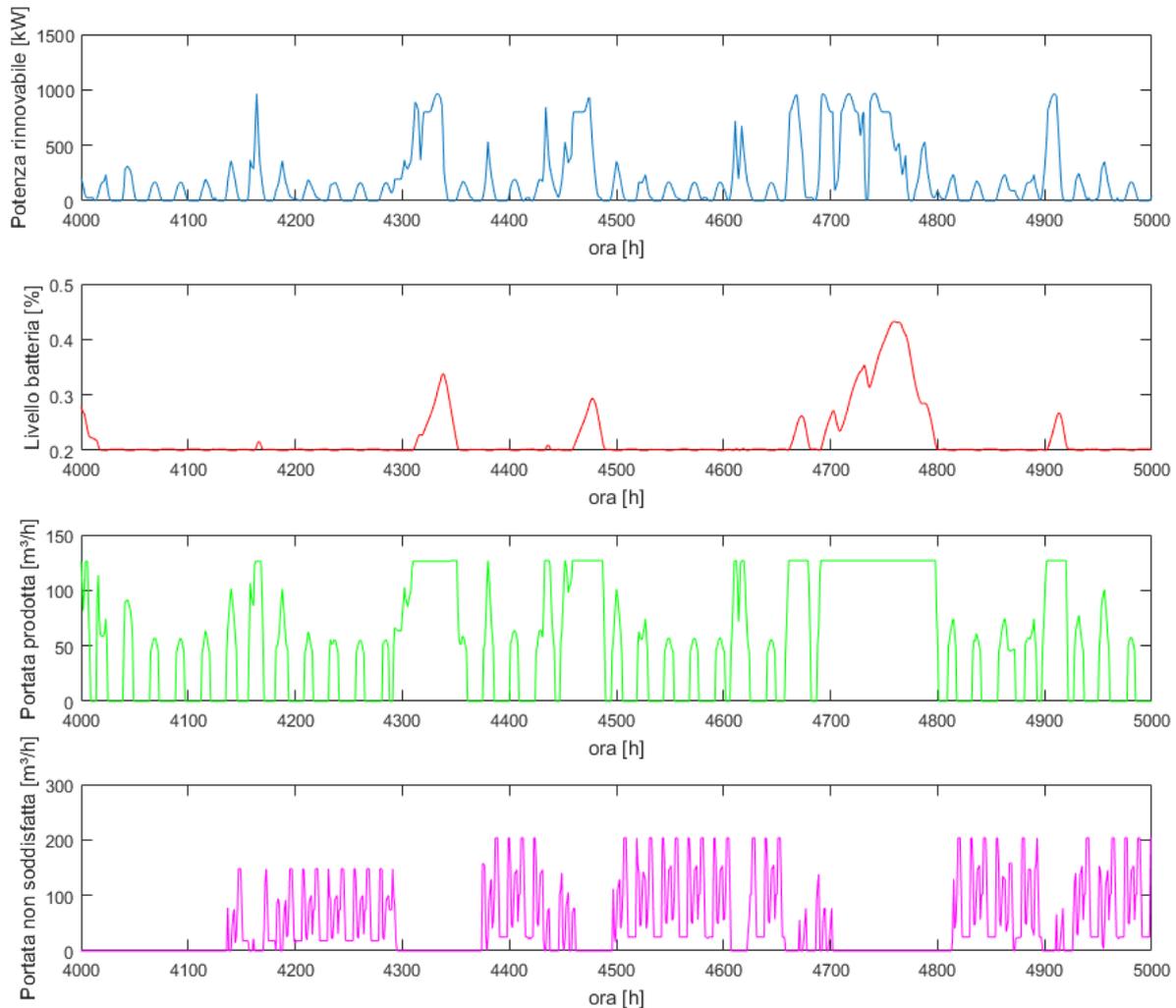


Figura 3.33. Grafici relativi al funzionamento del modello 2 per l'intervallo orario 4000-5000 h

Se si aumenta la capacità della batteria di sei volte, la capacità totale è pari a 264000 kWh. Considerando tale valore la frazione della totale energia rigettata durante un anno cala al 24.08%, valore inferiore del 40% rispetto alla situazione precedente. Tuttavia il tasso di copertura della domanda idrica aumenta meno rapidamente, infatti il valore che si ottiene di questo indicatore è 88.70%. Ne consegue che per aumentare il tasso di soddisfazione della domanda non si deve agire solamente sulla capacità della batteria. Infatti nei mesi estivi in cui la produzione di potenza da parte degli impianti eolico e fotovoltaico è elevata, il dissalatore lavora a carico nominale, ma nonostante ciò la portata prodotta è inferiore alla domanda: questo non permette di riempire sufficientemente il serbatoio di accumulo nelle ore in cui la richiesta è più bassa e perciò esso si svuota completamente quando si raggiunge il picco della domanda. È quindi opportuno pensare ad un aumento della taglia dell'impianto di desalinizzazione ed eventualmente anche ad un aumento del serbatoio di accumulo.

Se rispetto al caso iniziale si aumenta soltanto la potenza di design del dissalatore (quindi anche il numero di recipienti in pressione in parallelo), si osserva un piccolo aumento del tasso di copertura della domanda idrica, ma aumenta anche la frazione di energia rigettata. Infatti aumentando la potenza nominale a 1280 kW (a cui corrisponde un numero di 122 recipienti in pressione), il tasso di copertura aumenta solo fino a 87.02% e la percentuale di energia rigettata raggiunge il valore di 47.84%. Quindi non conviene aumentare molto la potenza nominale, piuttosto conviene aumentare anche il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua. Infatti, considerando un dissalatore con potenza nominale pari a 630 kW (57 recipienti in pressione), e un serbatoio con volume totale 25500 m³, cioè tre volte più grande rispetto al caso iniziale, si ottiene un tasso di copertura di 86.47% e una percentuale di energia rigettata pari a 40.05%. Il contributo della batteria è però basso, solamente del 10.32%, quindi conviene anche aumentare la capacità della batteria, in modo da diminuire l'energia rigettata ed aumentare il tasso di soddisfazione. Se con le stesse modifiche appena introdotte si triplica la capacità della batteria, ottenendo un valore di 132000 kWh, si ottiene una copertura del 89.86%, una percentuale di energia rigettata del 33.51% e un fattore di contribuzione della batteria pari a 13.61%.

Per ottenere risultati migliori bisognerebbe aumentare anche le taglie degli impianti eolico e fotovoltaico, ma in questo caso aumenterebbe nuovamente l'energia rigettata. Quindi si può pensare di fornire potenza anche ad un carico elettrico, in modo tale da sfruttare al meglio l'energia prodotta.

Il valore di capacità della batteria considerato nella configurazione base (44000 kWh) è però molto elevato rispetto alle taglie degli altri componenti d'impianto. Un valore così elevato della capacità di accumulo è dovuto al fatto che il carico idrico è molto sbilanciato durante l'anno, infatti in estate la domanda aumenta molto in seguito all'elevato afflusso di turisti. Inoltre in corrispondenza di questo aumento della domanda la potenza prodotta dall'impianto eolico diminuisce a causa della velocità del vento più bassa: essendo la taglia dell'impianto eolico (800 kW) maggiore di quella dell'impianto fotovoltaico (200 kW), la potenza rinnovabile in estate subisce una certa riduzione rendendo quindi necessario un elevato valore di capacità della batteria. Pertanto si può pensare di aumentare la taglia dell'impianto fotovoltaico e diminuire la capacità di accumulo della batteria, in modo tale da aumentare la produzione di energia soprattutto nei mesi estivi. Di seguito vengono riportati i valori delle taglie dei componenti d'impianto e i risultati della simulazione.

Tabella 3.6. Taglie dei componenti d'impianto

Componente	Taglia
Potenza installata fotovoltaico [kW]	800
Potenza installata eolico [kW]	800
Capacità nominale batteria [kWh]	8000
Potenza nominale dissalatore [kW]	480
Capacità serbatoio [m ³]	10000

Tabella 3.7. Risultati ottenuti considerando le taglie riportate in tabella 3.6

Parametro	Simbolo	Valore
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	88.15
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	54.22
Frazione di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del dissalatore	F_batt [%]	10.5
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	13.29
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	14.78
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	516550
Costo di produzione dell'acqua desalinizzata	W_cost [€/m ³]	1.96

Come si può osservare, aumentando la potenza nominale dell'impianto fotovoltaico, riducendo di molto la capacità della batteria ed aumentando di poco il volume del serbatoio di accumulo, i risultati che si ottengono sono migliori rispetto a quelli della configurazione base. Il tasso di soddisfazione della domanda idrica raggiunge l'88.15% e il costo di produzione dell'acqua desalinizzata diventa pari a 1.96 €/m³, mentre nella configurazione base tali indici sono rispettivamente pari a 86.5 % e 3.84 €/m³. Quindi il tasso di copertura della domanda idrica aumenta di circa il 2% mentre il costo di produzione diminuisce di circa il 49%. Avendo aumentato la potenza installata degli impianti di produzione di energia rinnovabile, i fattori di capacità diminuiscono e l'energia rigettata cresce: per poter ridurre tale valore si può pensare di soddisfare anche un carico elettrico, in modo tale da sfruttare meglio l'energia rinnovabile prodotta.

Queste osservazioni consentono di comprendere che anche aumentando di molto la capacità della batteria e del serbatoio di accumulo, i risultati che si ottengono sono meno soddisfacenti rispetto al caso in cui venga incrementata la potenza installata dell'impianto fotovoltaico, ridotta drasticamente la capacità di accumulo della batteria ed aumentato di poco il volume del serbatoio. In queste condizioni il tasso di copertura del carico idrico aumenta del 2% e il costo di produzione dell'acqua si abbassa del 49%. Dunque non è necessario che la capacità del sistema di batterie di accumulo sia così elevata come nella configurazione base, ma si possono utilizzare valori più bassi se la produzione di energia rinnovabile è alta anche nel periodo estivo. Lo svantaggio principale è il fatto che

L'aumento della potenza nominale dell'impianto di produzione di energia determina una maggiore quantità dell'energia rigettata verso l'esterno, pertanto, non volendo sovradimensionare il sistema di batterie per accumulare l'energia che altrimenti verrebbe rigettata, l'impianto può essere utilizzato non solo per la produzione di acqua dissalata, ma anche per fornire l'energia elettrica.

Nei successivi paragrafi si analizzano le configurazioni d'impianto in cui oltre a fornire acqua dissalata si fornisce agli utenti anche energia elettrica.

3.2 Configurazione con carico elettrico e generatore diesel

Nella seconda configurazione d'impianto analizzata si considera anche la presenza del carico elettrico e di un generatore diesel, in grado di soddisfare tale carico insieme agli impianti a fonte rinnovabile e alla batteria di accumulo. Il generatore diesel entra in funzione solamente per cedere potenza al carico elettrico, quando la potenza rinnovabile prodotta e l'energia accumulata nella batteria non sono in grado di soddisfare completamente tale carico.

L'impianto di desalinizzazione, invece, continua ad essere alimentato dagli impianti a fonte rinnovabile e dalla batteria.

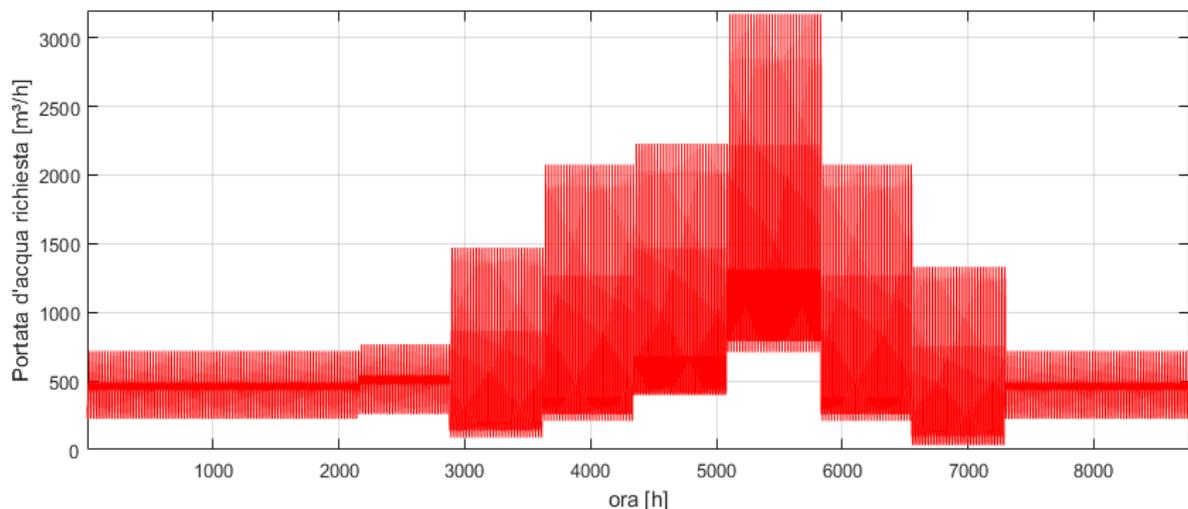


Figura 3.34. Andamento della curva di carico elettrico

3.2.1 Dimensionamento dei componenti d'impianto

Dato che aggiungendo il carico elettrico la richiesta di potenza aumenta in maniera rilevante, è stata aumentata la potenza installata degli impianti di produzione di energia. Nella tabella 3.8 vengono elencati i valori delle taglie dei vari componenti d'impianto, che sono state assunte per questa configurazione.

Tabella 3.8. Taglie dei componenti d'impianto

Componente	Taglia
Potenza installata fotovoltaico [kW]	2000
Potenza installata eolico [kW]	1600
Capacità nominale batteria [kWh]	8000
Potenza nominale dissalatore [kW]	630
Capacità serbatoio [m ³]	12000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	3175

Per ottenere la potenza installata dell'impianto fotovoltaico di 2000 kW sono stati considerati 6250 moduli con potenza nominale di 320 W; per l'impianto eolico sono state considerate due turbine eoliche da 800 kW; per l'impianto di desalinizzazione con potenza nominale di 630 kW sono stati considerati 57 recipienti in pressione, in modo da mantenere il consumo medio pari a 3 kWh/m³. La potenza nominale del generatore diesel è stata scelta pari al carico elettrico massimo, in modo tale che esso sia in grado di soddisfare completamente il carico anche in assenza degli impianti a fonte rinnovabile e della batteria.

Questi sono quindi i valori che sono stati cambiati, tutti gli altri parametri che caratterizzano i vari componenti, come ad esempio i rendimenti, la velocità di cut-in e di cut-out, rimangono invariati e pari a quelli assunti nella precedente analisi.

3.2.2 Risultati

I risultati della simulazione della seconda configurazione analizzata vengono riportati in tabella 3.9.

Si nota che inserendo il carico elettrico la potenza rigettata diminuisce notevolmente (del 48% rispetto all'ultimo caso studiato), perché la potenza prodotta viene per la maggior parte destinata al carico elettrico ed assorbita dall'impianto di desalinizzazione.

L'energia contenuta nella batteria viene prevalentemente utilizzata dal carico elettrico, il quale infatti presenta un fattore di contribuzione della batteria pari a 19.36%, mentre quello relativo all'impianto di desalinizzazione è solamente di 1.01%. Ciò è dovuto al fatto che il carico elettrico è assai più elevato della potenza nominale dell'impianto di desalinizzazione: il valore massimo del carico elettrico è pari a 3175 kW, mentre la potenza nominale dell'impianto di dissalazione è pari a 630 kW. Quando la potenza rinnovabile non è sufficiente a soddisfare tale carico, la batteria fornisce la potenza mancante. Questo porta la batteria a scaricarsi più frequentemente per soddisfare il carico elettrico rispetto a quanto essa si scaricava per l'impianto di desalinizzazione. È da tenere in considerazione anche il fatto che il carico elettrico deve essere soddisfatto

istantaneamente, mentre quello legato all'impianto di dissalazione è differibile, perciò viene data priorità al carico elettrico.

Tabella 3.9. Risultati della configurazione con carico elettrico e generatore diesel operante a carico variabile

Parametro	Simbolo	Valore
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	93.46
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	28.08
Frazione di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del dissalatore	F_batt [%]	1.01
Frazione di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del carico elettrico	F_batt_el [%]	19.36
Frazione di contribuzione del gen diesel alla fornitura di energia del carico elettrico	F_diesel_el [%]	32.67
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	17.28
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	23.64
Fattore di capacità del gen diesel	CF_diesel [%]	6.74
Numero di ore di funzionamento del gen diesel	n_ore_funz	2532
Numero di accensioni del gen diesel	n_acc	236
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	519973
Costo di produzione dell'acqua desalinizzata	W_cost [€/m ³]	1.62
Costo di produzione dell'energia elettrica	E_cost [€/kWh]	0.78

Il fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico è pari a 17.28% e quello dell'impianto eolico è pari a 23.64%: questi valori non sono molto elevati, ma per gli impianti a fonte rinnovabile ciò è dovuto alla aleatorietà delle fonti. Il fattore di capacità del generatore diesel è del 6.74%, infatti esso funziona per 2532 ore all'anno. Dal primo grafico di figura 3.8 si osserva che il generatore diesel funziona soprattutto in estate, quando l'aumento della popolazione dovuto al turismo determina un aumento sia del carico elettrico sia della richiesta di acqua. In tale periodo infatti l'energia contenuta nella batteria è al livello minimo, quindi entra in funzione il generatore diesel per fornire la potenza mancante, che non viene soddisfatta dalla potenza rinnovabile.

Il tasso di copertura della domanda di acqua desalinizzata è del 93.46%, valore migliore rispetto alla configurazione in cui viene fornita solamente acqua dissalata. Come si può vedere dal terzo grafico di figura 3.8, infatti, il serbatoio raggiunge il livello minimo in estate nel periodo tra 5000 h - 5800 h. Questo risultato è dovuto all'aumento della potenza installata degli impianti a fonti rinnovabile, della potenza nominale dell'impianto di dissalazione e del volume del serbatoio. La capacità di accumulo del sistema di batterie, invece, è stata scelta pari a 8000 kWh, in quanto un aumento ulteriore non determina benefici apprezzabili in termini di tasso di copertura del carico idrico.

La frazione di energia rigettata è del 28.08%, valore più basso rispetto a quello della prima configurazione. Infatti l'aggiunta del carico elettrico permette di utilizzare una quantità maggiore di energia rinnovabile, che nella configurazione precedente non poteva essere accumulata nella batteria quando essa era completamente carica e perciò veniva rigettata. Infine il costo di produzione dell'acqua è di 1.62 €/m³, il quale è più basso del costo dell'acqua che viene importata nell'isola, che è di circa 5-8 €/m³. Il costo di produzione dell'energia è di 0.78 €/kWh.

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

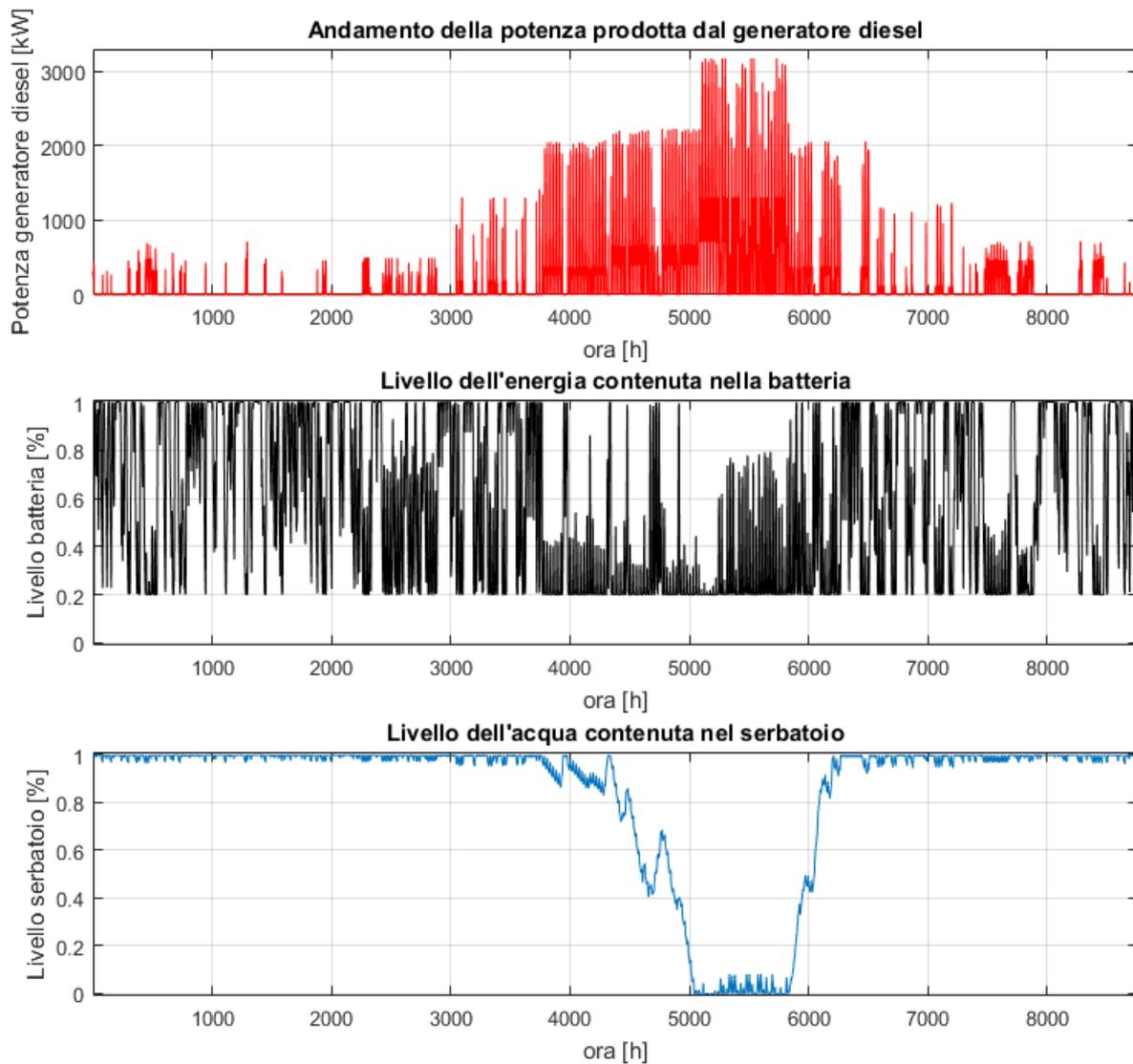


Figura 3.35. Grafici relativi alla configurazione con carico elettrico e generatore diesel operante a carico variabile

3.3 Configurazione con carico elettrico e generatore diesel che carica la batteria

In questa configurazione d'impianto sono presenti il carico elettrico e un generatore diesel, come nella configurazione precedente. Tuttavia la gestione del generatore diesel è diversa, perché esso non fornisce potenza solamente al carico elettrico, ma anche all'impianto di desalinizzazione e alla batteria.

Quando l'energia della batteria raggiunge un certo valore, in questo caso il valore minimo, il generatore entra in funzione lavorando a carico nominale. Esso quindi fornisce potenza sia al carico elettrico sia all'impianto di desalinizzazione e l'eccesso di potenza prodotta viene utilizzata per caricare la batteria, finché essa raggiunge il livello massimo di energia che è in grado di contenere: una volta raggiunto tale valore il generatore diesel smette di funzionare. Poiché il generatore diesel produce potenza in corrente alternata, per ricaricare la batteria è necessaria la presenza di un converter oppure di un inverter bidirezionale. In questa configurazione si considera un inverter bidirezionale che abbia lo stesso rendimento per entrambe le direzioni di flusso di potenza.

Il fatto di utilizzare il generatore diesel a carico nominale per fornire potenza al carico elettrico e all'impianto di desalinizzazione e per ricaricare la batteria, consente di scegliere un generatore con una potenza nominale più bassa. Infatti non dovendo seguire il carico elettrico ma lavorando a carico nominale, il generatore produce in alcune ore più potenza di quella necessaria, la quale viene accumulata nella batteria, che la restituisce quando il carico elettrico è più elevato. In questo modo non è necessario che la potenza nominale sia uguale a quella di picco del carico elettrico, come nel caso precedente.

3.3.1 Dimensionamento dei componenti d'impianto

Sono state cambiate anche le taglie degli altri componenti d'impianto, le quali vengono presentate nella seguente tabella.

Tabella 3.10. Taglie dei componenti d'impianto

Componente	Taglia
Potenza installata fotovoltaico [kW]	2000
Potenza installata eolico [kW]	1600
Capacità nominale batteria [kWh]	12000
Potenza nominale dissalatore [kW]	630
Capacità serbatoio [m ³]	12000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	1000

3.3.2 Risultati

Le taglie degli impianti a fonte rinnovabile, la potenza nominale dell'impianto di desalinizzazione e il volume del serbatoio sono stati mantenuti uguali a quelli della configurazione precedente, mentre la capacità della batteria è stata aumentata del 50% e la potenza nominale del generatore diesel è stata ridotta del 68.5%. La riduzione della potenza nominale del generatore diesel è permessa dal fatto che esso, quando entra in funzione, lavora sempre a carico nominale e la potenza prodotta in eccesso viene accumulata nella batteria.

Con questa configurazione anche se il carico idrico e quello elettrico non sono completamente soddisfatti, i relativi tassi di copertura sono comunque molto elevati. Per coprire totalmente i carichi si dovrebbero aumentare le taglie degli impianti di produzione di energia oppure la capacità della batteria: tali osservazioni verranno riprese successivamente quando verrà effettuata l'ottimizzazione dell'impianto.

La percentuale di energia rigettata è del 30.31%: per annullarla sarebbe necessario installare una batteria con una capacità nominale molto maggiore, pari a $4 \cdot 10^6$ kWh, ma dato l'elevato costo di questo componente non sarebbe conveniente dal punto di vista economico, in quanto il costo d'investimento totale dell'impianto passerebbe da $1.5 \cdot 10^7$ € a $1.37 \cdot 10^9$ €.

Tabella 3.11. Risultati della configurazione con carico elettrico e generatore diesel operante a carico nominale

Parametro	Simbolo	Valore
Tasso di copertura della domanda d'acqua	F_ds [%]	96.65
Tasso di copertura del carico elettrico	F_el [%]	95.9
Frazione di energia rigettata	F_rej [%]	30.32
Frazione di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del dissalatore	F_batt [%]	3.59
Frazione di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del carico elettrico	F_batt_el [%]	31.66
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico	CF_pv [%]	16.7
Fattore di capacità dell'impianto eolico	CF_wt [%]	22.96
Fattore di capacità del gen diesel	CF_diesel [%]	25.61
Numero di ore di funzionamento del gen diesel	n_ore_funz	2243
Numero di accensioni del gen diesel	n_acc	106
Quantità di acqua prodotta	W_ap [m ³ /anno]	535331
Costo di produzione dell'acqua desalinizzata	W_cost [€/m ³]	2.34
Costo di produzione dell'energia elettrica	E_cost [€/kWh]	0.36

Il fattore di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per l'impianto di dissalazione è pari a 3.59%, mentre quello relativo alla fornitura del carico elettrico è pari

a 31.66% ed entrambi sono più elevati dei valori corrispondenti della configurazione precedente, in quanto in questo caso il generatore diesel contribuisce alla carica della batteria stessa, che quindi si carica e si scarica molto frequentemente, come si può osservare dal secondo grafico di figura 3.9.

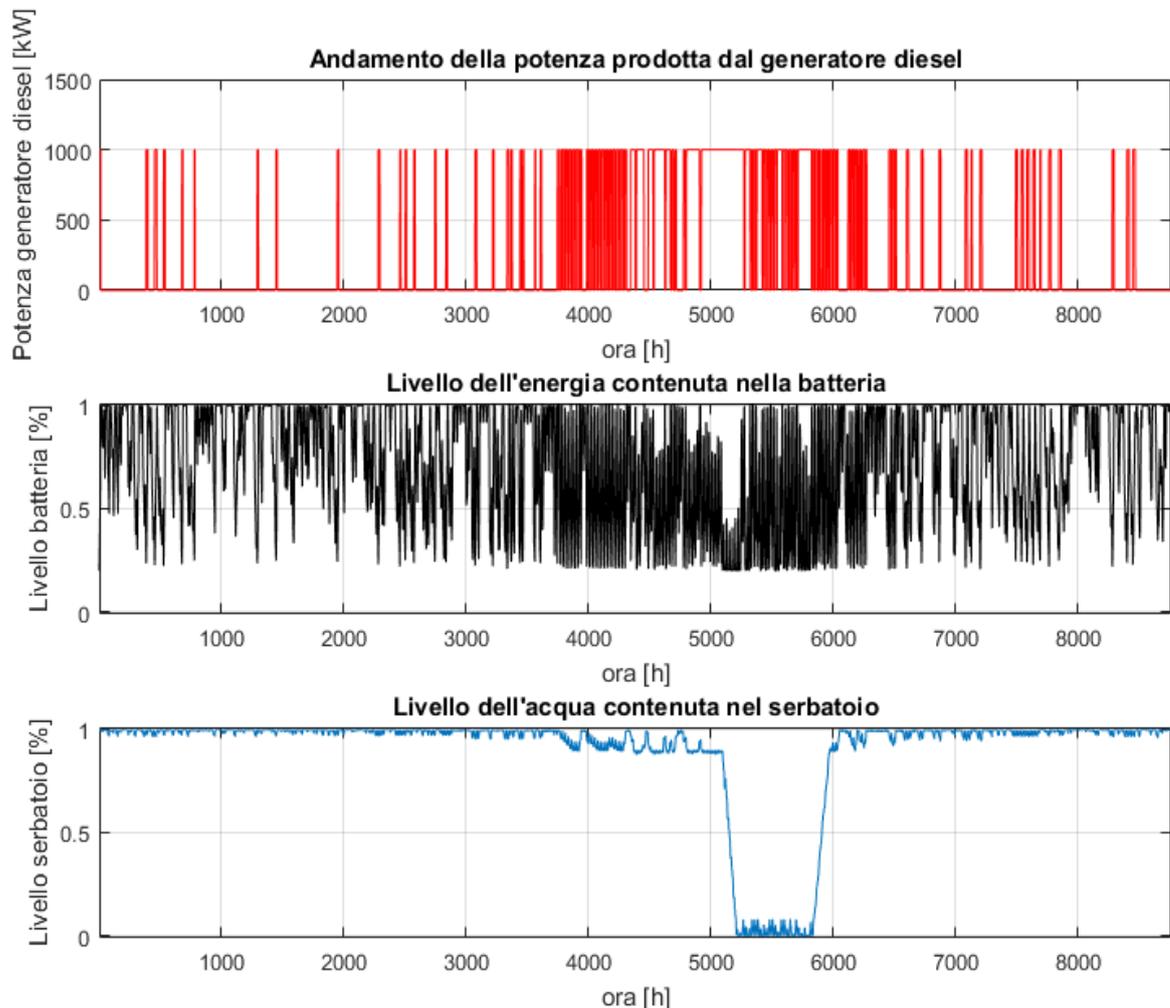


Figura 3.36. Grafici relativi alla configurazione con carico elettrico e generatore diesel operante a carico nominale

Il fattore di capacità del generatore diesel è pari a 25.61% più elevato rispetto a quello della configurazione precedente, che era pari a 6.74%, nonostante in questo caso il numero di ore di funzionamento sia più basso di 289 ore, perché la potenza nominale del generatore diesel è stata ridotta del 68.5%. Dal momento che esso è un generatore ausiliario, è normale che il fattore di capacità sia basso, ma proprio per tale motivo è più conveniente che la potenza nominale sia la più bassa possibile, in modo da non avere un generatore di grande taglia che viene però utilizzato poco.

Per quanto riguarda il costo di produzione dell'acqua desalinizzata è di 2.34 €/m³, il quale è inferiore del 53% rispetto al costo che deve essere sostenuto per l'importazione della

risorsa mediante trasporto via mare, che risulta essere pari a 5 €/m³. Il costo di produzione dell'energia invece si è abbassato del 54% rispetto alla configurazione precedente, probabilmente per il fatto che viene utilizzato un generatore con potenza nominale inferiore.

Capitolo IV

Ottimizzazione della configurazione d'impianto di sola desalinizzazione

In questo capitolo viene innanzitutto presentato l'algoritmo per l'ottimizzazione dell'impianto di dissalazione oggetto di studio di questa tesi. Viene presentata la procedura di ottimizzazione e, quindi, vengono discussi i risultati ottenuti, confrontandoli tra loro per comprendere le relazioni tra le variabili di ottimizzazione ed i principali indici di prestazione dell'impianto.

4.1 Algoritmo genetico

L'algoritmo genetico, introdotto per la prima volta da Henry Holland nel 1975, è un algoritmo euristico che si ispira alla teoria della selezione naturale ed evoluzione biologica elaborata da Charles Darwin ed è utilizzato per la risoluzione di problemi di ottimizzazione vincolata e non vincolata [28].

Questo tipo di algoritmo è detto genetico in quanto applica dei meccanismi del tutto analoghi a quelli dei processi biochimici studiati dalla genetica, al fine di ricercare in modo stocastico la soluzione ottimale ad un certo problema.

Gli algoritmi genetici, infatti, sono impiegati in ambito ingegneristico per la ricerca di soluzioni ottimali a problemi complessi, in cui la funzione obiettivo è discontinua oppure fortemente non lineare e per i quali perciò i metodi di ottimizzazione classici sono inefficaci o troppo dispendiosi.

Questo algoritmo ricerca la soluzione ottimale per la minimizzazione della funzione obiettivo, operando su un insieme di possibili soluzioni al problema, dette individui, i quali formano una certa popolazione. Se, invece, si vuole massimizzare la funzione obiettivo si deve operare sull'opposto della funzione obiettivo che si intende massimizzare. Gli individui sono dei vettori con numero di componenti pari al numero delle variabili da ottimizzare.

Il modo in cui agisce un algoritmo genetico è il seguente. La popolazione iniziale viene creata in modo casuale, prendendo dei valori casuali delle variabili di ottimizzazione all'interno del dominio stabilito. L'algoritmo testa gli individui di una data popolazione attraverso la funzione di fitness, la quale rappresenta la funzione obiettivo del problema: il valore che ciascun individuo fa assumere alla funzione di fitness è una misura della

bontà della soluzione al problema. Sulla base di tale valore l'algoritmo seleziona i migliori individui della popolazione per creare, mediante i meccanismi di crossover e di mutazione, una nuova popolazione, cioè una seconda generazione. Il processo di selezione è simile a quello di selezione naturale, secondo cui sopravvivono gli individui più forti (ovvero quelli più efficaci). Il meccanismo di crossover consiste nella ricombinazione casuale del patrimonio genetico di due individui, detti genitori, al fine di creare un terzo individuo, detto figlio, che presenta caratteristiche di entrambi i genitori. Invece, la mutazione consiste nel cambiamento casuale del patrimonio genetico di un solo individuo. Però gli individui che presentano i valori più bassi della funzione di fitness sono selezionati come "élite" e passano inalterati alla seconda generazione.

Una volta creata la seconda generazione, l'algoritmo procede con il testare gli individui di questa nuova popolazione mediante la funzione di fitness e allo stesso modo crea una terza generazione. L'algoritmo viene iterato finché si giunge ad uno dei seguenti criteri di stop [29]:

- 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.

4.1.1 L'algoritmo genetico disponibile in Matlab

Per effettuare l'ottimizzazione dell'impianto oggetto di studio di questa tesi è stato utilizzato l'algoritmo genetico presente all'interno di Matlab, la cui funzione per richiamarlo presenta la seguente sintassi [29]:

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

- 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 $c_{eq}(x)$, che rappresentano rispettivamente i vettori dei vincoli non lineari di disuguaglianza e di uguaglianza che devono essere soddisfatti:

$$c(x) < 0$$

$$c_{eq}(x) = 0$$

- $IntCon$ 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.

La funzione di fitness e i vincoli non lineari vengono realizzati come function di Matlab, mentre gli altri parametri dell'algoritmo genetico ed i comandi per l'esecuzione dello stesso vengono implementati in uno script, da cui viene fatta eseguire l'ottimizzazione.

4.2 Ottimizzazione dell'impianto di desalinizzazione

L'ottimizzazione che si intende eseguire si pone come obiettivo l'individuazione delle taglie dei vari componenti d'impianto al fine di minimizzare il costo di produzione dell'acqua dissalata.

Le variabili di ottimizzazione sono:

1. il numero di turbine eoliche, ciascuna di potenza nominale di 800 kW;
2. il numero di moduli fotovoltaici, ognuno dei quali ha una potenza di picco di 320 W;

3. la potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa;
4. il volume del serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua desalinizzata;
5. la capacità totale delle batterie di accumulo dell'energia.

4.2.1 Funzione di fitness

La funzione di fitness consiste nella minimizzazione del costo di produzione dell'acqua dissalata. Tale funzione viene riportata all'interno della function "obiettivo", che riceve in ingresso il vettore x le cui componenti sono le variabili di ottimizzazione e restituisce in uscita il costo di produzione dell'acqua. All'interno di questa funzione vengono riportate sia le equazioni per effettuare la simulazione dell'impianto, sia quelle relative ai costi totali necessari per il calcolo del costo di produzione dell'acqua dissalata.

Innanzitutto vengono definite le cinque variabili di ottimizzazione, riferendo ciascuna di esse ad un elemento del vettore x . Una volta che è stato specificato quali variabili devono essere ottimizzate, vengono richiamati i dati climatici necessari per effettuare la simulazione dell'impianto e il numero di residenti, il quale viene utilizzato per calcolare la domanda idrica. Dunque vengono definiti tutti i parametri relativi all'impianto, come ad esempio la velocità di cut-in e di cut-out della turbina eolica, i rendimenti dell'impianto fotovoltaico ed eolico ed altri parametri, utilizzando gli stessi valori presentati nei capitoli precedenti. I parametri quali il numero di turbine eoliche, il numero di moduli fotovoltaici, la potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa, il volume del serbatoio di stoccaggio e la capacità totale del sistema di batterie non vengono definiti in quanto essi sono le variabili che si intende ottimizzare.

Una volta specificati tutti i parametri relativi all'impianto viene richiamato il modello realizzato con Simulink, in modo tale da effettuare la simulazione del funzionamento dell'impianto durante tutte le ore dell'anno, la quale è necessaria per il calcolo del volume totale di acqua desalinizzata prodotta in un anno.

Successivamente vengono definiti i costi d'investimento e quelli operativi e di manutenzione di tutti i componenti, ovvero i costi relativi alle turbine eoliche, all'impianto fotovoltaico, all'impianto di osmosi inversa, al serbatoio di stoccaggio ed al sistema di batterie per l'accumulo dell'energia. I costi che vengono utilizzati sono quelli riportati nel capitolo II.

Il costo di produzione dell'acqua dissalata rientra nell'analisi dell'investimento dell'impianto e pertanto devono essere specificati il tasso di sconto e il numero di anni di vita dell'impianto, ovvero il numero di anni che si suppone che esso sia funzionante. In questa sede viene utilizzato un tasso di sconto del 5% e si suppone che l'impianto funzioni per 20 anni. Con questi dati viene calcolato il costo di produzione dell'acqua

desalinizzata, che rappresenta la variabile da minimizzare, utilizzando l'equazione riportata di seguito:

$$W_{cost} = \frac{IC_{tot} \cdot f_a + OM_{tot}}{W_{AP}}$$

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

$$IC_{tot} = IC_{wt} + IC_{pv} + IC_{inv} + IC_{bat} + IC_{desal}$$

$$OM_{tot} = OM_{wt} + OM_{pv} + OM_{inv} + OM_{desal}$$

4.2.2 Limiti delle variabili di ottimizzazione

Le variabili di ottimizzazione non possono assumere qualsiasi valore, ma possono variare solamente all'interno del loro dominio, il quale viene definito dai limiti superiore ed inferiore. Così ad ogni generazione la selezione degli individui viene ristretta al solo dominio di appartenenza delle variabili, limitando perciò i valori assunti dalle variabili durante il processo di ottimizzazione.

I limiti superiore ed inferiore di ognuna delle variabili da ottimizzare sono presentati nella seguente tabella.

Tabella 4.5. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	2
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	13000
Capacità batterie [kWh]	5000	12000

Come limite superiore del numero di turbine eoliche è stato scelto un valore pari a 2, in quanto con due turbine eoliche la potenza installata del campo eolico sarebbe di 1600 kW, valore elevato rispetto al carico massimo richiesto dall'impianto di dissalazione. Infatti, il carico idrico presenta il valore massimo di 314,5 m³/h: considerando un consumo medio dell'impianto di osmosi inversa pari a 3 kWh/m³, la potenza massima assorbita è di 943.5 kW. Si nota quindi che installando più turbine eoliche e considerando

anche la presenza del campo fotovoltaico, la potenza installata sarebbe troppo elevata rispetto al carico, cosa che determinerebbe un valore elevato della potenza rigettata.

Il numero dei moduli fotovoltaici è compreso tra 625 e 2500: il limite inferiore corrisponde ad una potenza nominale dell'impianto fotovoltaico di 200 kW, come nella configurazione base, mentre il limite superiore corrisponde alla potenza di 800 kW. Quest'ultimo valore è stato scelto perché, come è stato osservato, aumentando la potenza del campo fotovoltaico si ottengono risultati migliori, in quanto la risorsa solare è abbondantemente presente in estate a differenza di quella eolica, che presenta velocità del vento basse per periodi piuttosto lunghi, rendendo minima o nulla la produzione di energia elettrica da tale fonte.

La potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa presenta un limite inferiore di 480 kW, che corrisponde alla domanda oraria di acqua media annuale di 160 m³: non si ritiene opportuno considerare valori più bassi in quanto ciò determinerebbe, a parità di altre condizioni, una diminuzione del tasso di copertura della domanda idrica. Considerando un valore maggiore di portata oraria media annua pari a 215 m³, il valore di potenza nominale dell'impianto di dissalazione è di circa 650 kW: tale valore è stato perciò considerato come limite superiore.

Per quanto riguarda il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua viene considerato come valore minimo il valore di 8500 m³, a cui corrisponde un'autonomia pari a due giorni di agosto. Il limite superiore, invece, è di 13000 m³ a cui corrisponde un'autonomia di circa tre giorni di agosto.

Per la capacità delle batterie di accumulo viene considerato l'intervallo di 5000-12000 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 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.

4.2.3 Vincoli non lineari

Oltre ai limiti imposti alle variabili di ottimizzazione, devono essere soddisfatti anche determinati 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. Tuttavia come è stato osservato nel capitolo III la percentuale di energia rigettata in questa configurazione d'impianto è comunque abbastanza elevata, in quanto, data l'aleatorietà della risorsa eolica e della risorsa solare, è necessario sovradimensionare gli impianti di produzione dell'energia da fonte rinnovabile, mentre il sistema di accumulo è in grado di accumulare solo una parte dell'energia prodotta in eccesso. 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.

4.2.4 Parametri prestazionali dell' algoritmo

I parametri prestazionali dell'algoritmo genetico che vengono impostati sono la dimensione della popolazione, il numero di generazioni, l'élite count e 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. Vengono eseguite diverse simulazioni con popolazioni e generazioni diverse, ma per ognuno di questi due parametri non viene mai superato il valore di 200.

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. Entrambe vengono poste prima pari a 10^{-3} , poi pari a 10^{-5} .

4.3 Risultati dell'ottimizzazione

Come detto precedentemente sono state eseguite diverse simulazioni con dimensioni di popolazione e numero di generazioni diverse per valutare l'accuratezza dei risultati

dell'ottimizzazione. La tolleranza utilizzata nelle prime quattro simulazioni è di 10^{-3} , mentre l'ultima simulazione è stata effettuata utilizzando una tolleranza di 10^{-5} .

I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 4.6. 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}	1	2500	650	12968	5475	1.91	94	55
80	100	10^{-3}	1	2500	650	12966	5473	1.91	94	55
160	200	10^{-3}	1	2500	650	12967	5471	1.91	94	55
200	200	10^{-3}	1	2500	650	12967	5471	1.91	94	55
200	200	10^{-5}	1	2500	650	12968	5474	1.91	94	55

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. I valori delle variabili di ottimizzazione sono quelli riportati in tabella 4.2 e come si può vedere i vincoli imposti sono stati rispettati. Il volume del serbatoio è prossimo al valore limite superiore e permette di ottenere un'autonomia di fornitura d'acqua pari a tre giorni di agosto.

Aumentando la popolazione fino a 80 e il numero di generazioni fino a 100 l'ottimizzazione termina perché la variazione media del valore della funzione obiettivo è inferiore alla tolleranza imposta, perciò l'algoritmo giunge a convergenza. I risultati delle variabili di ottimizzazione sono pressoché uguali a quelli del caso precedente e quindi anche il valore della funzione obiettivo è il medesimo, ossia pari a 1.91 €/m³. I vincoli sul tasso di copertura della domanda di acqua e sulla percentuale di energia rigettata vengono entrambi rispettati e sono uguali a quelli della simulazione precedente.

La terza e la quarta simulazione, quella con pop=160 e gen=200 e quella con pop=200 e gen=200 e con tolleranza di 10^{-3} , presentano gli stessi risultati, che sono in linea con quelli delle simulazioni precedenti. L'ultima simulazione, in cui la tolleranza è di 10^{-5} , presenta risultati pressoché uguali a quelle precedenti.

Nelle diverse simulazioni le variazioni dei risultati del volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua e della capacità delle batterie di accumulo sono minimi e non influenzano il valore del costo di produzione dell'acqua. Pertanto si può concludere che tutte e cinque le simulazioni effettuate conducono agli stessi risultati.

Confrontando i risultati ottenuti con quelli della configurazione non ottimizzata riportata nel capitolo II, si può osservare che la soluzione ottimale 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 presenta un costo di produzione dell'acqua di 3.94 €/m³ ed un tasso di soddisfazione della domanda

di 81%, mentre gli stessi parametri nella soluzione ottimale sono rispettivamente pari a 1.91 €/m³ e 94%. Questi risultati migliori si ottengono grazie all'aumento della potenza installata dell'impianto fotovoltaico, dell'impianto di osmosi inversa, del volume del serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua e grazie alla diminuzione della capacità del sistema di batterie.

Già nel capitolo III era stato osservato che delle variazioni simili delle taglie dei componenti dell'impianto producevano risultati migliori sia in termini di costo sia di tasso di copertura della domanda. Per aumentare il tasso di copertura della domanda idrica risulta più conveniente aumentare la potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa e il volume del serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua piuttosto che aumentare la capacità delle batterie.

Tuttavia aumentando di molto la capacità delle batterie si ridurrebbe la percentuale di energia rigettata, ma aumenterebbe anche il costo dell'impianto essendo le batterie generalmente costose.

Per quanto riguarda la percentuale di energia rigettata, essa è molto elevata, perché gli impianti eolico e fotovoltaico sono sovradimensionati a causa dell'aleatorietà delle fonti rinnovabili. Infatti, per ottenere elevati valori del tasso di copertura della domanda idrica, è necessario produrre una maggiore quantità di energia nei periodi di disponibilità delle risorse rinnovabili ed accumulare l'eccesso nelle batterie. Tuttavia una parte consistente di energia non viene accumulata perché le batterie sono completamente cariche e quindi viene dissipata. Come già detto solo aumentando di molto la capacità di queste ultime e riducendo la potenza installata degli impianti di produzione dell'energia si potrebbe ridurre la percentuale di energia rigettata, ma ciò sembra non essere conveniente dal punto di vista economico.

Dai risultati dell'ottimizzazione si ottengono i seguenti grafici del livello del serbatoio di stoccaggio dell'acqua desalinizzata e del livello della batteria di accumulo dell'energia, riportati in figura 4.1.

Si può notare che il serbatoio di stoccaggio in estate si svuota completamente a causa dell'elevata richiesta di acqua desalinizzata dovuta al turismo, il quale determina un aumento della popolazione dell'isola fino a circa il doppio. La batteria si scarica e si carica in estate, in quanto in inverno il livello del serbatoio non scende al di sotto del 90%, condizione imposta per il funzionamento della batteria.

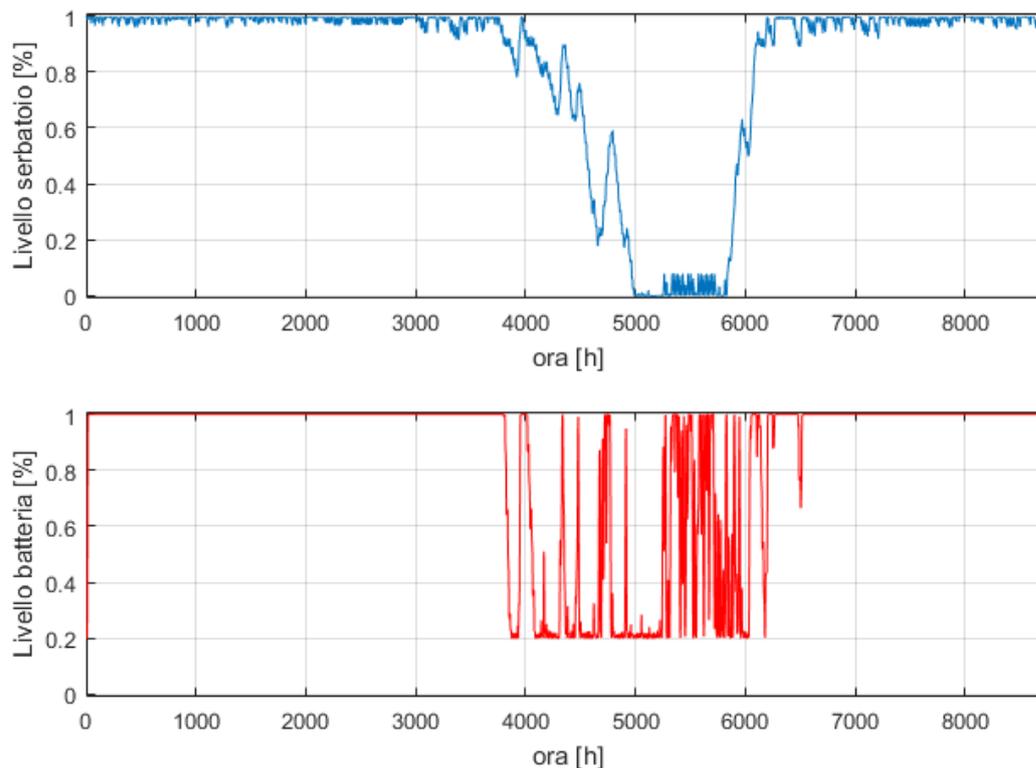


Figura 4.37. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria

Per analizzare i motivi del consistente utilizzo dell'acqua contenuta nel serbatoio in estate si devono osservare i grafici di figura 4.2 relativi al funzionamento dell'impianto per l'intervallo orario 3800 h – 6000 h, che rappresenta il periodo in cui, data l'elevata domanda di acqua, il serbatoio si svuota completamente e la batteria funziona scaricandosi e ricaricandosi frequentemente.

Osservando il grafico del livello dell'acqua contenuta nel serbatoio si può notare che esso inizia a scaricarsi d'estate, tra 3800 h e 5000 h, quando l'energia prodotta dagli impianti a fonte rinnovabile è bassa a causa della ridotta velocità del vento che rende la fonte eolica poco presente. In questo periodo funziona principalmente l'impianto fotovoltaico, mentre l'impianto eolico produce energia per un numero ridotto di ore, limitando così la potenza elettrica disponibile. L'impianto di desalinizzazione quindi lavora con potenza variabile a seconda della disponibilità della potenza elettrica. Essendo la domanda idrica crescente, data la più bassa disponibilità di potenza elettrica, l'impianto di desalinizzazione non è in grado di fornire da solo l'acqua richiesta dalle utenze, perciò il serbatoio inizia a scaricarsi fornendo la quantità d'acqua necessaria per coprire la domanda. In questo periodo il carico idrico viene soddisfatto completamente grazie all'acqua stoccata all'interno del serbatoio.

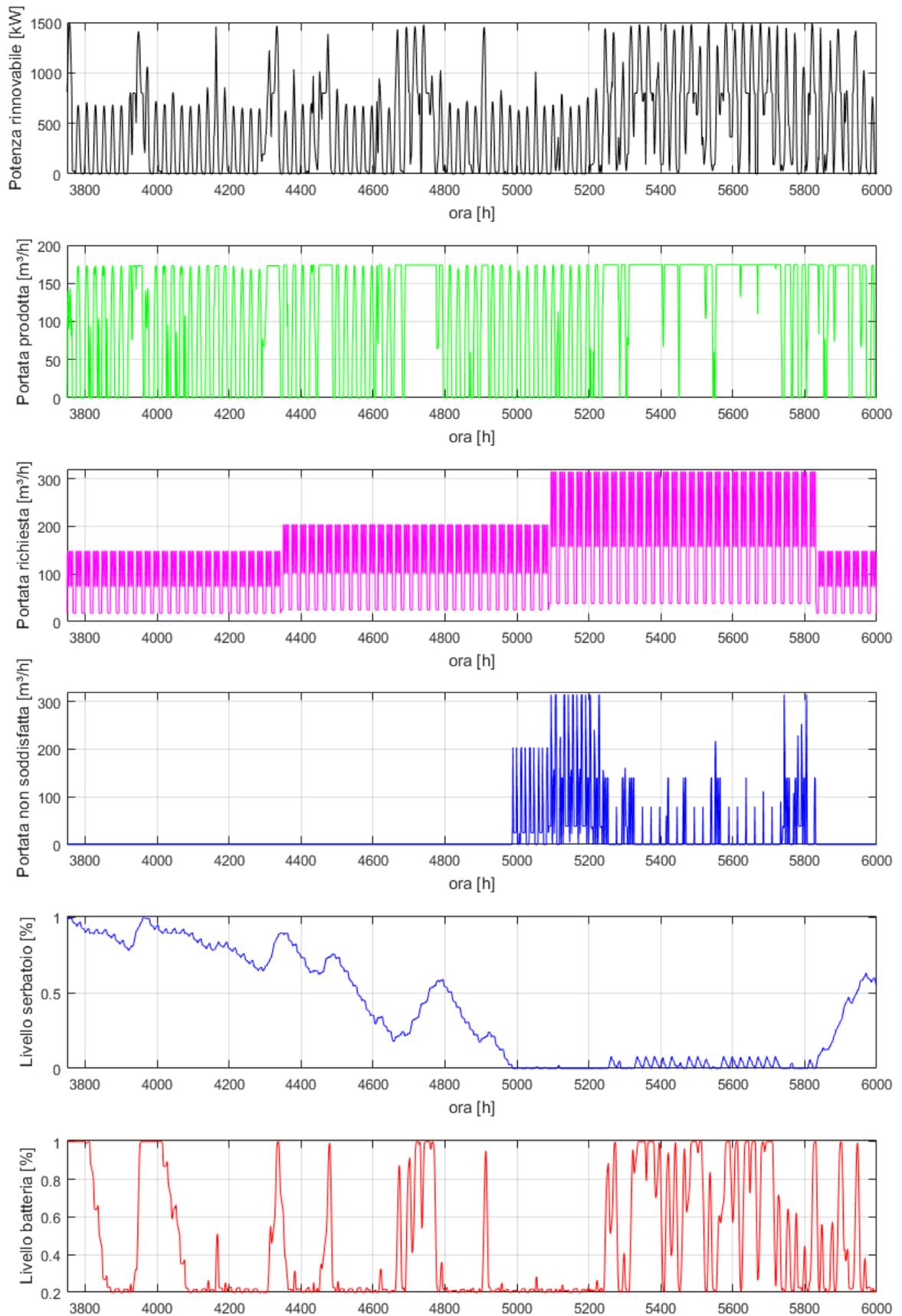


Figura 4.38. Grafici degli andamenti orari di alcune grandezze per l'intervallo orario 3800-6000 h

Il livello dell'acqua nel serbatoio tra 3800 h e 5000 h subisce anche degli incrementi in corrispondenza delle ore in cui è disponibile la risorsa eolica: la potenza prodotta è elevata e questo permette all'impianto di desalinizzazione di funzionare a carico nominale per più ore consecutive incrementando il livello dell'acqua nel serbatoio. La potenza prodotta in eccesso viene utilizzata per ricaricare le batterie, che si scaricano nei periodi di assenza di produzione di energia da parte dell'impianto eolico.

Tra 5000 h e 5300 h c'è ancora una ridotta produzione di energia e quindi anche di acqua desalinizzata, mentre il carico idrico risulta essere crescente. Poiché il serbatoio di stoccaggio è stato precedentemente svuotato, esso non è in grado di fornire la portata d'acqua necessaria per soddisfare completamente il carico idrico, pertanto una buona parte di esso non viene soddisfatta. In questo periodo anche le batterie sono scariche e quindi non possono fornire potenza all'impianto di dissalazione affinché lavori a carico nominale per più ore.

Nelle ore successive la risorsa eolica torna ad essere maggiormente disponibile, quindi l'impianto di dissalazione può lavorare a carico nominale per molte ore consecutive e la batteria inizia a caricarsi e scaricarsi con molta frequenza fungendo così da sistema di accumulo dell'energia. Nonostante l'elevata produzione di acqua dissalata, il carico idrico non viene soddisfatto completamente in quanto esso è elevato e il serbatoio è stato scaricato completamente nelle ore precedenti. Il serbatoio, infatti, non viene ricaricato in maniera significativa proprio perché l'acqua prodotta viene quasi tutta consumata nel momento in cui viene prodotta. Si possono osservare dei piccoli incrementi del livello dell'acqua, ma il serbatoio viene subito svuotato e perciò parte del carico idrico non viene soddisfatto.

4.4 Analisi di sensibilità

Oltre all'ottimizzazione descritta sono state eseguite altre simulazioni cambiando i limiti delle variabili di ottimizzazione, in modo tale da vedere se la soluzione appena individuata è quella ottimale oppure se variando i domini delle variabili si possono ottenere altre soluzioni migliori. La soluzione individuata nell'ottimizzazione precedente verrà chiamata "configurazione base", mentre le altre ottimizzazioni verranno chiamate "test" al fine di distinguerle tra loro.

4.4.1 Test n°1

Poiché nella configurazione base il valore ottimale del serbatoio di stoccaggio dell'acqua desalinizzata è prossimo al limite superiore imposto, come primo test si è scelto di eseguire un'ottimizzazione variando i limiti di tale variabile. I limiti relativi al volume del serbatoio che sono stati considerati in questo test sono 1-20000 m³, mentre quelli

relativi alle altre variabili di ottimizzazione sono stati mantenuti uguali a quelli della configurazione base.

Tabella 4.7. Limite inferiore e limite superiore del test n°1

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	2
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	1	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	12000

Risultati

Tabella 4.8. Risultati del test n°1

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	1	2339	637	19824	5003	1.88	94	54
200	200	10 ⁻³	1	2368	636	19415	5000	1.88	94	54
200	200	10 ⁻⁵	1	2368	636	19415	5000	1.88	94	54

Sono state eseguite tre simulazioni, la prima in cui pop=40 e gen=50, la seconda in cui pop=200 e gen=200, considerando in entrambe una tolleranza di 10⁻³, e la terza considerando pop=200, gen=200 ed una tolleranza di 10⁻⁵.

La prima simulazione termina per il raggiungimento del numero massimo di generazioni, mentre le altre due terminano perché l'algoritmo giunge a convergenza. I risultati della prima simulazione sono leggermente diversi da quelli delle altre due, che sono identici, tuttavia le variazioni del numero di moduli fotovoltaici e del volume del serbatoio di stoccaggio sono piccole e non influenzano il costo di produzione dell'acqua, il tasso di copertura della domanda idrica e la percentuale di energia rigettata, i cui valori sono uguali in tutte le simulazioni.

Confrontando i risultati con la configurazione base, si può osservare che l'aumento del volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua permette di ridurre la potenza installata dell'impianto di osmosi inversa, il numero di moduli fotovoltaici e la capacità delle batterie. L'autonomia dell'impianto in questo caso è pari a 4.5 giorni di agosto. Il costo di produzione dell'acqua è leggermente inferiore, mentre il tasso di copertura della domanda idrica e la percentuale di energia rigettata sono i medesimi.

Di seguito vengono riportati i grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello dell'energia delle batterie. Tali grafici sono del tutto analoghi ai corrispondenti della configurazione base, perciò il funzionamento nei due casi è simile.

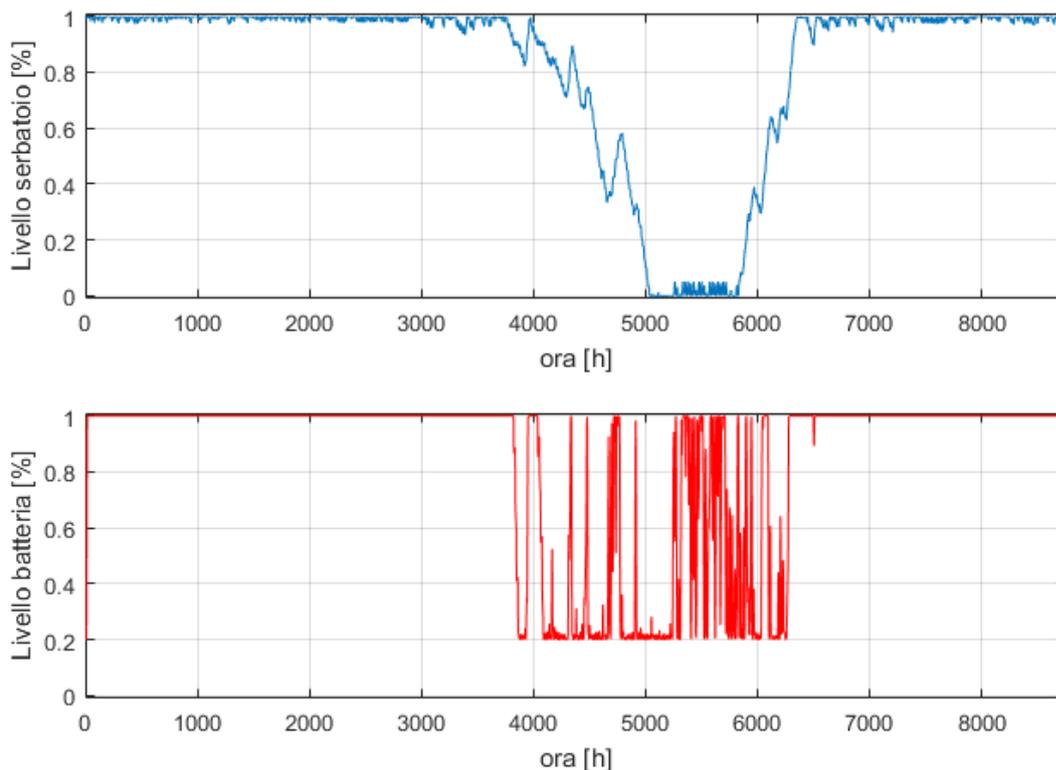


Figura 4.39. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°1

4.4.2 Test n°2

Il secondo test consiste nella variazione dei limiti della capacità delle batterie, la quale perciò viene fatta variare tra 100 e 15000 kWh, mentre i limiti delle altre variabili di ottimizzazione sono mantenuti uguali a quelli della configurazione base. Con questa simulazione si vuole vedere se ampliando il dominio della capacità delle batterie essa può assumere un valore ottimale diverso da quello della configurazione base.

Tabella 4.9. Limite inferiore e limite superiore del test n°2

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	2
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	13000
Capacità batterie [kWh]	100	15000

Risultati

Tabella 4.10. Risultati del test n°2

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	1	2497	650	12930	5706	1.92	94	55
200	200	10 ⁻³	1	2500	650	12959	5475	1.91	94	55
200	200	10 ⁻⁵	1	2500	650	12968	5474	1.91	94	55

Anche in questo caso sono state eseguite tre simulazioni come nel test precedente. La prima simulazione è terminata per il raggiungimento del numero massimo di generazioni, mentre la seconda e la terza perché l'algoritmo è giunto a convergenza. I risultati delle simulazioni sono abbastanza simili tra loro, ad eccezione della capacità delle batterie, che nella prima simulazione è un po' più elevata. Nel confronto con la configurazione base però si tengono in considerazione i risultati ottenuti nella terza simulazione, in quanto in questo caso i risultati sono più precisi, perché l'algoritmo è terminato per raggiungimento della convergenza e la tolleranza imposta è minore. Confrontando i risultati con quelli della configurazione base si nota che sono uguali: questo dimostra il fatto che diminuendo o aumentando la capacità delle batterie, a parità di altre condizioni, non si ottengono risultati migliori.

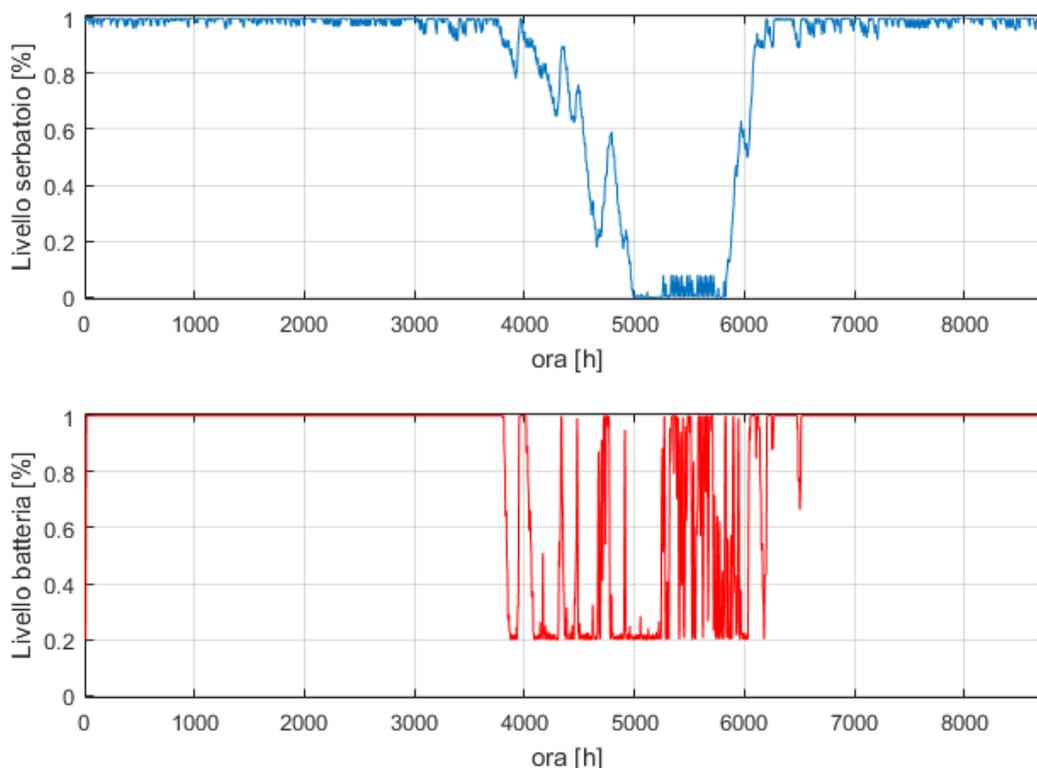


Figura 4.40. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°2

Essendo le variabili di ottimizzazione uguali a quelle della configurazione base, anche il costo di produzione dell'acqua, il tasso di soddisfazione del carico idrico e la percentuale di energia rigettata sono i medesimi, così come i grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello dell'energia contenuta nelle batterie (figura 4.4).

4.4.3 Test n°3

Per il terzo test è stato deciso di aumentare ad 8 il limite superiore del numero di turbine eoliche, considerando però che ognuna di esse abbia una potenza nominale di 200 kW anziché di 800 kW. In questo modo si vuole osservare se, frazionando la potenza nominale dell'impianto eolico, si ottengono valori ottimali diversi della potenza installata dei due impianti di produzione dell'energia e se il costo di produzione diventa inferiore a quello della configurazione base.

I parametri caratteristici della turbina quali la velocità di cut-in, la velocità di cut-out, la velocità nominale e l'altezza del mozzo sono mantenuti invariati. Il costo relativo alle turbine eoliche non è stato variato, essendo questo stato espresso per unità di potenza nominale (infatti il costo di installazione è di 1300 €/kW).

Tabella 4.11. Limite inferiore e limite superiore del test n°3

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	8
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	13000
Capacità batterie [kWh]	5000	12000

Risultati

Tabella 4.12. Risultati del test n°3

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	6	2290	637	12585	5033	1.97	94	63
200	200	10 ⁻³	5	2424	650	12923	5000	1.93	94	58
200	200	10 ⁻³	5	2434	650	12979	5000	1.93	94	58

Anche in questo caso sono state eseguite tre simulazioni come nei test precedenti. I risultati delle prime due simulazioni differiscono non solo per le variabili di ottimizzazione, ma anche per quanto riguarda il costo di produzione dell'acqua e della

percentuale di energia rigettata. L'ultima simulazione, invece, presenta dei risultati pressoché uguali alla seconda.

Per il confronto dei risultati con la configurazione base si prendono in considerazione i risultati dell'ultima simulazione. In questa simulazione la potenza installata dell'impianto eolico è pari a 1000 kW, superiore rispetto a quella della configurazione base che è di 800 kW. Inoltre il numero di moduli fotovoltaici è leggermente inferiore ed anche la capacità delle batterie di accumulo è minore. Il costo di produzione dell'acqua è superiore a quello della configurazione base. Anche la percentuale di energia rigettata è superiore, a causa alla maggiore potenza installata totale degli impianti di produzione dell'energia. Dunque con delle turbine eoliche di potenza nominale inferiore i risultati dell'ottimizzazione non sono migliori, anzi il costo di produzione dell'acqua è leggermente superiore, mentre il tasso di copertura della domanda idrica rimane invariato e la percentuale di energia rigettata è aumentata.

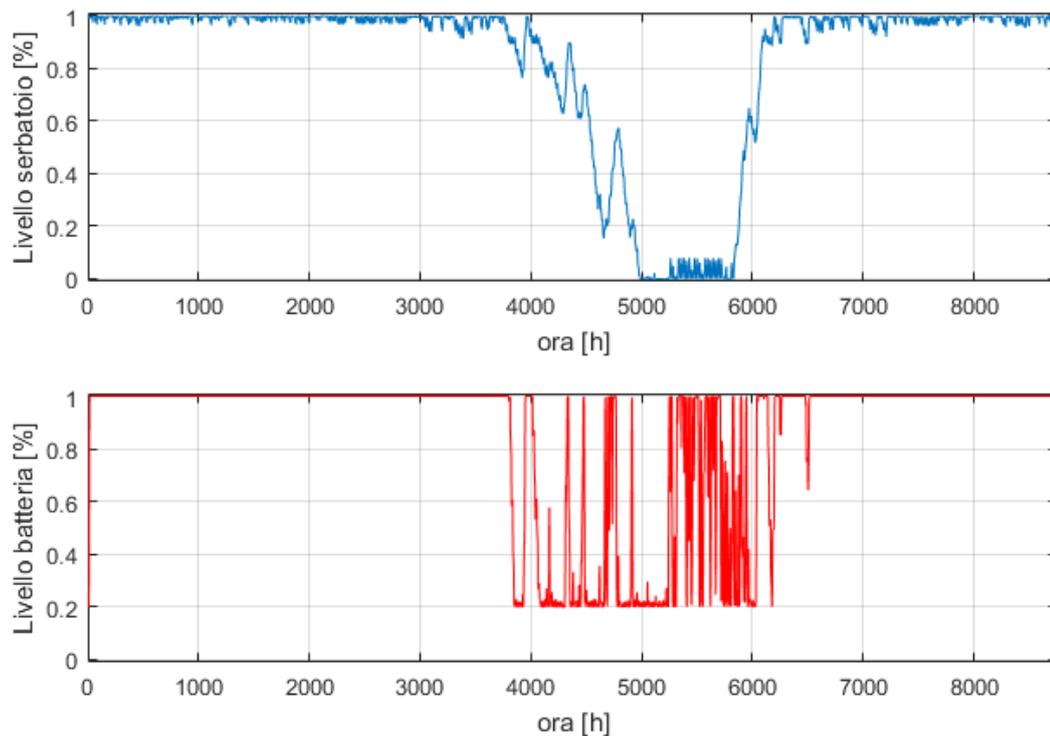


Figura 4.41. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°3

Dai grafici di figura 4.5 si può osservare che il funzionamento dell'impianto è del tutto analogo a quello della configurazione base, infatti i valori ottimali delle potenze installate dei componenti dell'impianto, del volume del serbatoio e della capacità delle batterie non sono molto diversi.

4.4.4 Test n°4

Poiché in tutti i test precedentemente eseguiti il volume del serbatoio ha sempre assunto valori molto prossimi al limite superiore, anche nel test n°2 in cui il limite superiore è stato aumentato, si è scelto di effettuare un test aumentando ulteriormente questo limite. Lo scopo di questo test è quello di vedere se il valore ottimale del volume del serbatoio si trova verso valori superiori. Pertanto vengono fissati i valori di tutte le variabili di ottimizzazione ad eccezione del volume del serbatoio, per il quale si considera un limite inferiore di 15000 m³ ed un limite superiore di 200000 m³.

Tabella 4.13. Limite inferiore e limite superiore del test n°4

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	1
Numero moduli fotovoltaici	2368	2368
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	636	636
Volume serbatoio [m ³]	15000	200000
Capacità batterie [kWh]	5000	5000

Risultati

Tabella 4.14. Risultati del test n°4

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 [%]
200	200	10 ⁻⁵	1	2368	636	56791	5000	1.86	100	50

La simulazione è stata eseguita considerando pop=200 e gen=200 ed una tolleranza pari a 10⁻⁵.

Il volume ottimale del serbatoio di stoccaggio dell'acqua è molto elevato, ma distante dal limite superiore. Con un tale volume del serbatoio la domanda idrica viene completamente soddisfatta, infatti il tasso di copertura è del 100%. Inoltre tale volume permette di ottenere un'autonomia dell'impianto di dissalazione di circa 13 giorni di agosto.

Il costo di produzione dell'acqua dissalata è di poco inferiore rispetto al valore della configurazione base (pari a 1.91 €/m³) nonostante il volume del serbatoio sia aumentato, perché in questo caso la produzione di acqua dissalata è maggiore e ciò riduce il costo di produzione.

Nonostante tutte le variabili di ottimizzazione ad eccezione del volume del serbatoio siano uguali a quelle del test n°1, la percentuale di energia rigetta in questo caso è inferiore

perché, essendo il volume del serbatoio maggiore, esso necessita di tempi più lunghi per il suo riempimento quindi viene utilizzata una maggiore quantità di energia.

Di seguito vengono riportati i grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello dell'energia delle batterie (figura 4.6). Il primo grafico è diverso dal corrispondente della configurazione base, perché, essendo il volume del serbatoio di stoccaggio molto elevato, il livello dell'acqua al suo interno si annulla solamente una volta riuscendo però sempre a soddisfare completamente la domanda idrica.

Il grafico della batteria differisce da quello della configurazione base per il fatto che essa inizia a scaricarsi e ricaricarsi in tempi successivi, perché l'aumento del volume del serbatoio determina un ritardo nell'entrata in funzione della batteria in quanto il livello scende al di sotto del 90% in tempi successivi. Mentre nella configurazione base il sistema di batterie termina di fornire energia all'impianto ad osmosi inversa prima di 7000 h, in questo test ciò avviene a circa 7000 h, perché essendo più grande il volume è necessaria una maggiore quantità di acqua per riempirlo fino al 90% e ciò richiede più tempo.

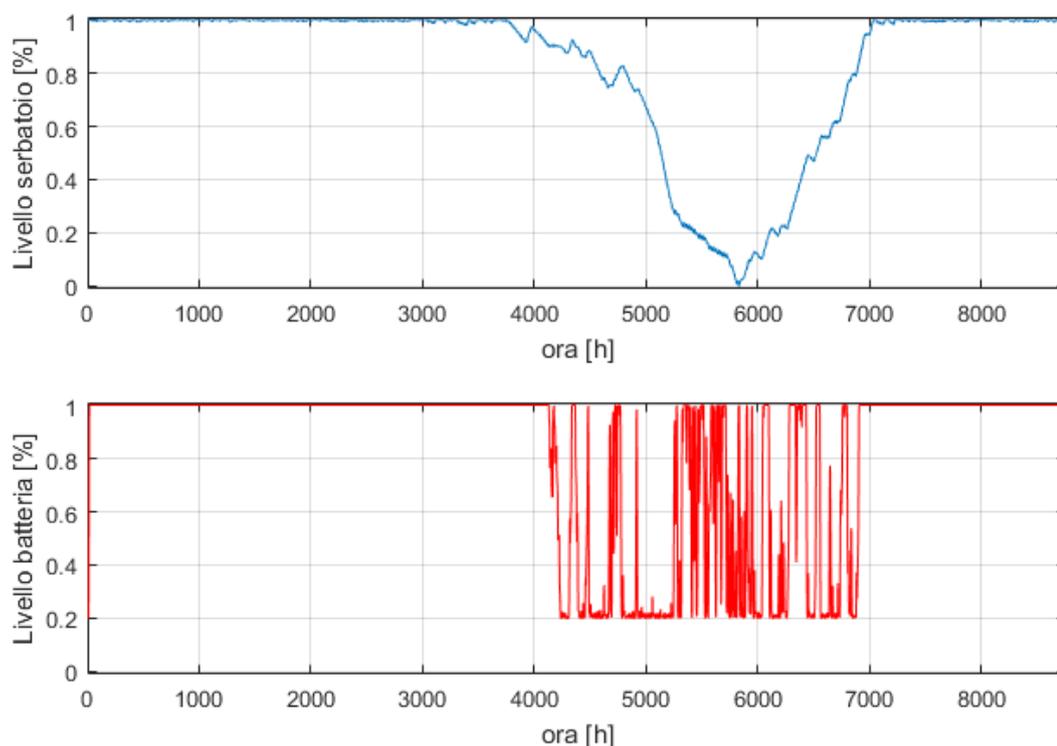


Figura 4.42. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°4

4.4.5 Test n°5

In questo test viene fissato il volume del serbatoio, il quale viene preso pari a 500 m³, mentre per le altre variabili si considerano gli stessi limiti assunti nella configurazione base. Tale volume, essendo molto piccolo, permette all'impianto di ottenere un'autonomia di circa due ore durante le ore di massima richiesta d'acqua di un giorno di

agosto. Con queste assunzioni si vuole vedere quali sono gli effetti della diminuzione del volume del serbatoio sui costi e sulle altre variabili di ottimizzazione.

Tabella 4.15. Limite inferiore e limite superiore del test n°5

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	2
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	500	500
Capacità batterie [kWh]	5000	12000

Risultati

Tabella 4.16. Risultati del test n°5

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 [%]
200	200	10 ⁻⁵	1	2500	650	500	12000	2.35	90	58

La simulazione è stata eseguita considerando pop=200 e gen=200 ed una tolleranza pari a 10⁻⁵.

Come si può osservare, diminuendo il volume del serbatoio, tutte le altre variabili di ottimizzazione (ad eccezione del numero di turbine eoliche) assumono i valori massimi possibili. Il costo di produzione dell'acqua aumenta in quanto la produzione risulta essere inferiore a causa del minore volume del serbatoio.

Il tasso di copertura della domanda idrica, infatti, è più basso ed è inferiore a 94%, il quale è stato imposto come valore di vincolo per tale indice. Pertanto, diminuendo di molto il volume del serbatoio, non si riescono a rispettare tutti i vincoli imposti, cosa che suggerisce la necessità di utilizzare dei volumi maggiori. La percentuale di energia rigettata, invece, è maggiore rispetto a quella della configurazione base.

I grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello dell'energia nelle batterie sono riportati in figura 4.7.

Essendo il volume del serbatoio di stoccaggio molto piccolo, il livello dell'acqua presenta delle oscillazioni maggiori durante tutto l'anno, in particolare d'estate si annulla più frequentemente con conseguente diminuzione del tasso di copertura della domanda idrica. Il serbatoio si svuota completamente già prima di 4000 h, mentre nella configurazione base il livello del serbatoio si annullava la prima volta intorno a 5000 h.

La batteria si scarica e si carica più frequentemente, anche in inverno, in quanto il livello del serbatoio scende al di sotto del 90%, valore imposto per l'entrata in funzione delle batterie.

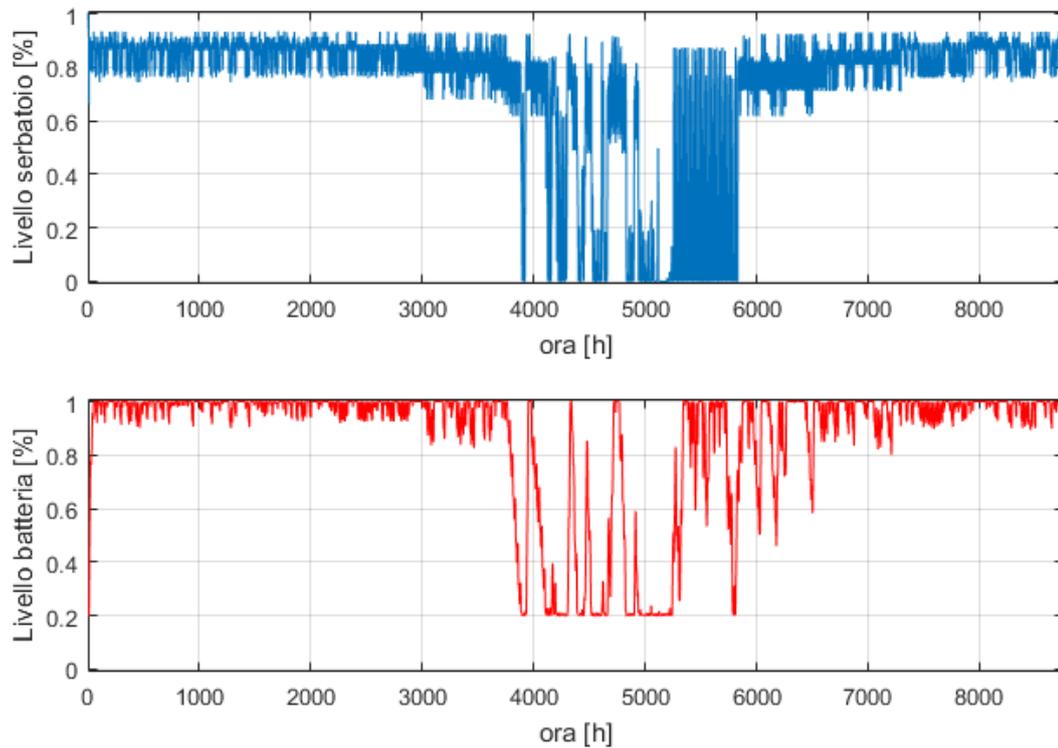


Figura 4.43. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°5

4.4.6 Test n°6

Poiché nel test n°4 il valore ottimale del volume del serbatoio è piuttosto elevato, in questa simulazione si vuole vedere come variano i valori delle variabili di ottimizzazione e gli altri indici, quando il costo d'investimento del serbatoio è maggiore.

Dunque si considerano gli stessi limiti assunti per la configurazione base, ma si aumenta di due ordini di grandezza il costo d'investimento del volume del serbatoio che perciò diventa pari a:

$$IC_{tank} = 109080 \cdot V_{tc}^{0.61}$$

Tabella 4.17. Limite inferiore e limite superiore del test n°6

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	2
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	15000
Capacità batterie [kWh]	5000	12000

Risultati

Tabella 4.18. Risultati del test n°6

Pop	Gen	Toll	N_wt	N_pv	P_di [kW]	V_tc [m³]	E_batt_nom [kWh]	Costo acqua [€/m³]	F_ds [%]	F_rej [%]
200	200	10 ⁻⁵	1	2499	650	8500	8324	6.11	94	55

La simulazione è stata eseguita considerando pop=200 e gen=200 ed una tolleranza pari a 10⁻⁵.

Aumentando il costo d’investimento del serbatoio, il volume di questo diminuisce ed assume il valore del limite inferiore. Invece, la capacità delle batterie aumenta per compensare la riduzione del volume del serbatoio. Il costo di produzione è aumentato come si attendeva, in seguito all’aumento del costo d’investimento. Il tasso di copertura è pari a 94%, il quale è il valore limite inferiore che è stato imposto come vincolo per tale indice. L’autonomia dell’impianto nella fornitura d’acqua è pari a due giorni di agosto. I grafici seguenti sono simili a quelli della configurazione base.

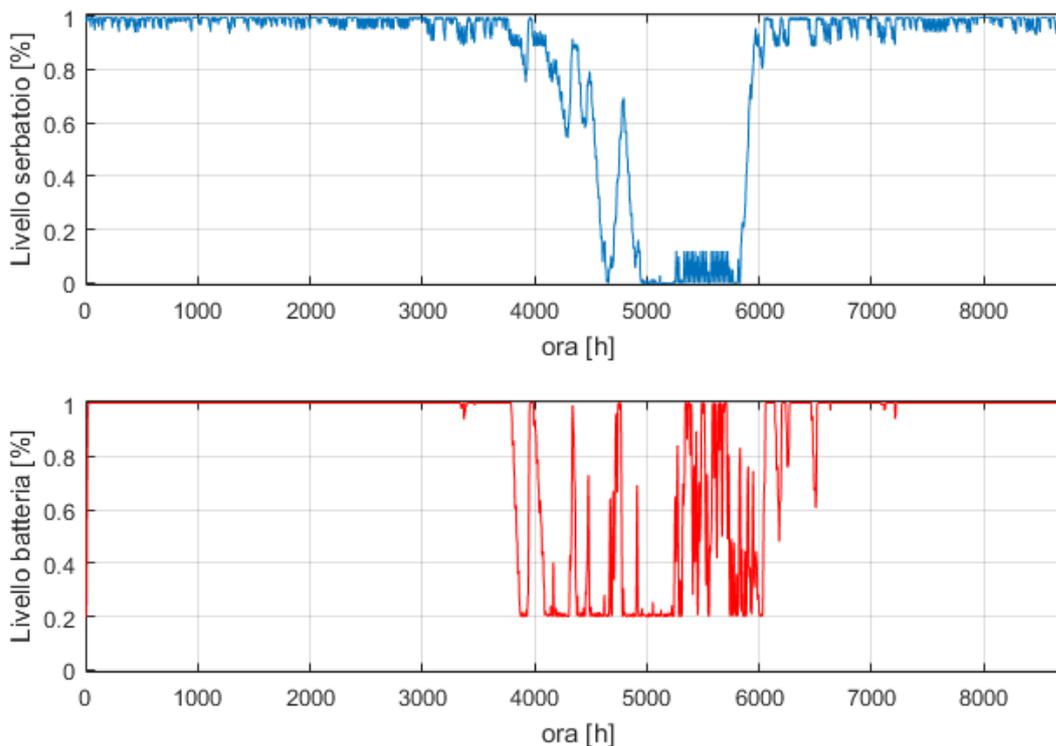


Figura 4.44. Grafici del livello dell’acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°6

4.4.7 Test n°7

Poiché nel test precedente il valore assunto dal volume del serbatoio è pari a quello del limite inferiore, è stata eseguita un'altra simulazione in cui tale limite è stato assunto pari a 0 m³, in modo tale da vedere fino a quale valore il volume si può abbassare. Con questa nuova ipotesi i risultati ottenuti sono i seguenti.

Tabella 4.19. Risultati del test n°7

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 [%]
200	200	10 ⁻⁵	1	2500	650	5179	11737	5.22	94	55

Come si può osservare il volume del serbatoio si è abbassato ulteriormente mentre la capacità delle batterie di accumulo è aumentata: questo suggerisce che con il nuovo costo del serbatoio convenga aumentare la capacità delle batterie piuttosto che il volume del serbatoio, in quanto questo risulta essere più costoso. Il costo di produzione dell'acqua desalinizzata è inferiore rispetto al caso precedente, ma è ancora troppo elevato. I vincoli sul tasso di copertura e sulla percentuale di energia rigettata sono ancora rispettati e sono uguali al caso precedente. Dato il volume del serbatoio che si ottiene in questa simulazione, l'autonomia dell'impianto risulta essere pari a 1.2 giorni di agosto.

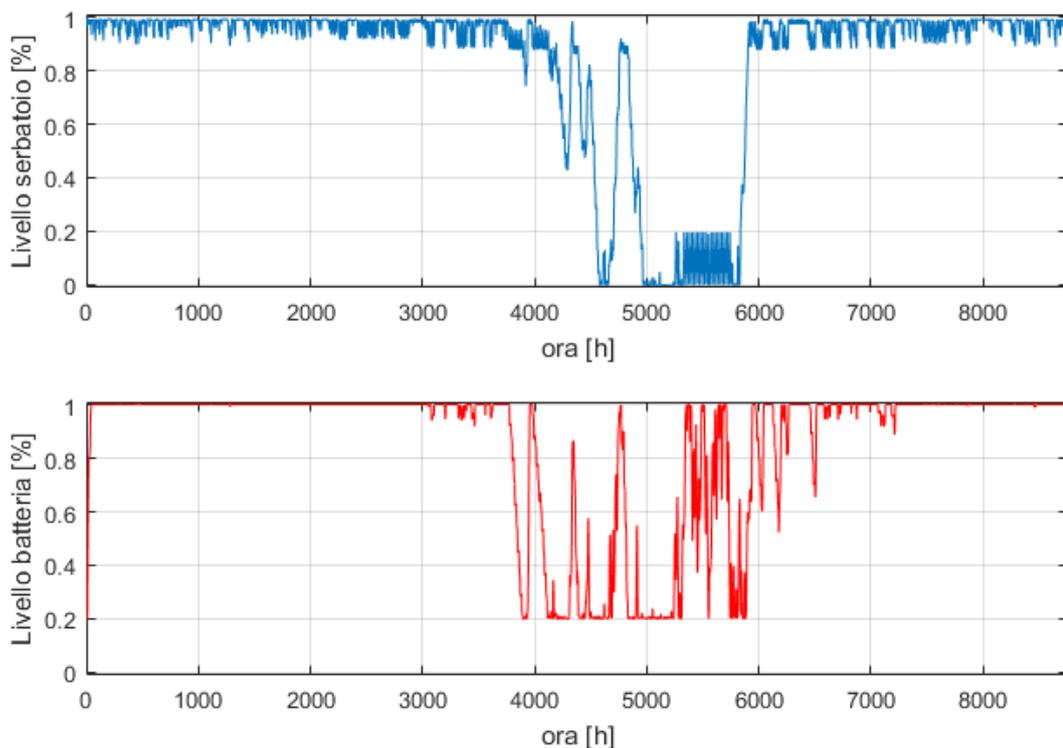


Figura 4.45. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°7

I grafici di figura 4.9 sono abbastanza simili a quelli del test precedente, anche se in questo caso le batterie presentano un minimo funzionamento anche nel periodo invernale, in quanto, essendo più piccolo il serbatoio, il livello scende sotto il 90% qualche volta anche in inverno.

4.4.8 Test n°8

Il test n°8 è del tutto analogo al test n°7, ma in questo caso il costo d'investimento del serbatoio di accumulo è stato aumentato di un ordine di grandezza rispetto alla configurazione base, quindi risulta:

$$IC_{tank} = 10908 \cdot V_{tc}^{0.61}$$

Risultati

Tabella 4.20. Risultati del test n°8

Pop	Gen	Toll	N_wt	N_pv	P_di [kW]	V_tc [m³]	E_batt_nom [kWh]	Costo acqua [€/m³]	F_ds [%]	F_rej [%]
200	200	10 ⁻⁵	1	2500	650	12785	5571	2.39	94	55

La simulazione è stata eseguita considerando pop=200 e gen=200 ed una tolleranza pari a 10⁻⁵.

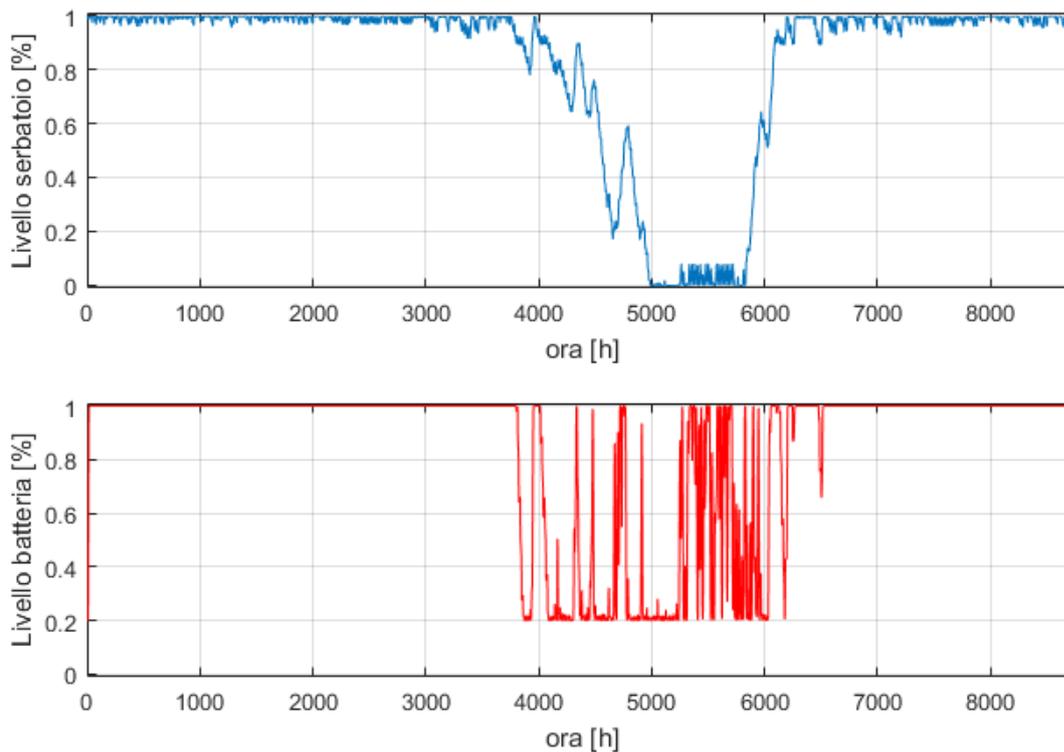


Figura 4.46. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°8

Aumentando il costo d'investimento solamente di un ordine di grandezza, si ottengono circa gli stessi valori delle variabili di ottimizzazione della configurazione base. Il costo di produzione tuttavia è maggiore, in quanto i costi totali sono aumentati, ma i risultati in termini di soddisfazione del carico idrico e di energia rigettata sono i medesimi.

Anche i grafici di figura 4.10 sono analoghi ai corrispondenti della configurazione base.

4.4.9 Test n°9

Come nel test n°5 in questo test viene fissato il volume del serbatoio di accumulo, il quale in questo caso viene assunto pari a 2000 m³, mentre le altre variabili di ottimizzazione vengono fatte variare entro i limiti riportati di seguito. Con un tale volume del serbatoio l'autonomia dell'impianto risulta essere pari a mezza giornata di agosto. Il costo d'investimento del serbatoio viene assunto pari a quello della configurazione base.

Tabella 4.21. Limite inferiore e limite superiore del test n°9

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	2
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	2000	2000
Capacità batterie [kWh]	5000	12000

Risultati

Tabella 4.22. Risultati del test n°9

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 [%]
200	200	10 ⁻⁵	1	2500	650	2000	12000	2.26	93	55

La simulazione è stata eseguita considerando pop=200 e gen=200 ed una tolleranza pari a 10⁻⁵.

Poiché il volume del serbatoio è ridotto rispetto alla configurazione base, tutte le altre variabili di ottimizzazione, ad eccezione del numero di turbine eoliche, assumono il valore limite superiore. In particolare la batteria assume il valore limite superiore probabilmente per compensare la forte riduzione del volume del serbatoio. Il costo di produzione dell'acqua dissalata è più elevato di quello della configurazione base, ma più basso del costo del test n°5 che era di 2.35 €/m³, in quanto il volume del serbatoio è maggiore e ciò determina una maggiore produzione di acqua con conseguente riduzione del costo. Inoltre la maggior produzione permette di ottenere un maggiore tasso di copertura della domanda idrica rispetto a quello che si ottiene nel test n°5, tuttavia anche

in questo caso esso è inferiore a 94% che rappresenta il vincolo imposto su tale parametro. La percentuale di energia rigettata è pari a 55% e quindi il vincolo su questo parametro viene rispettato. Di seguito vengono riportati i grafici del livello dell'acqua all'interno del serbatoio e del livello dell'energia contenuta nelle batterie.

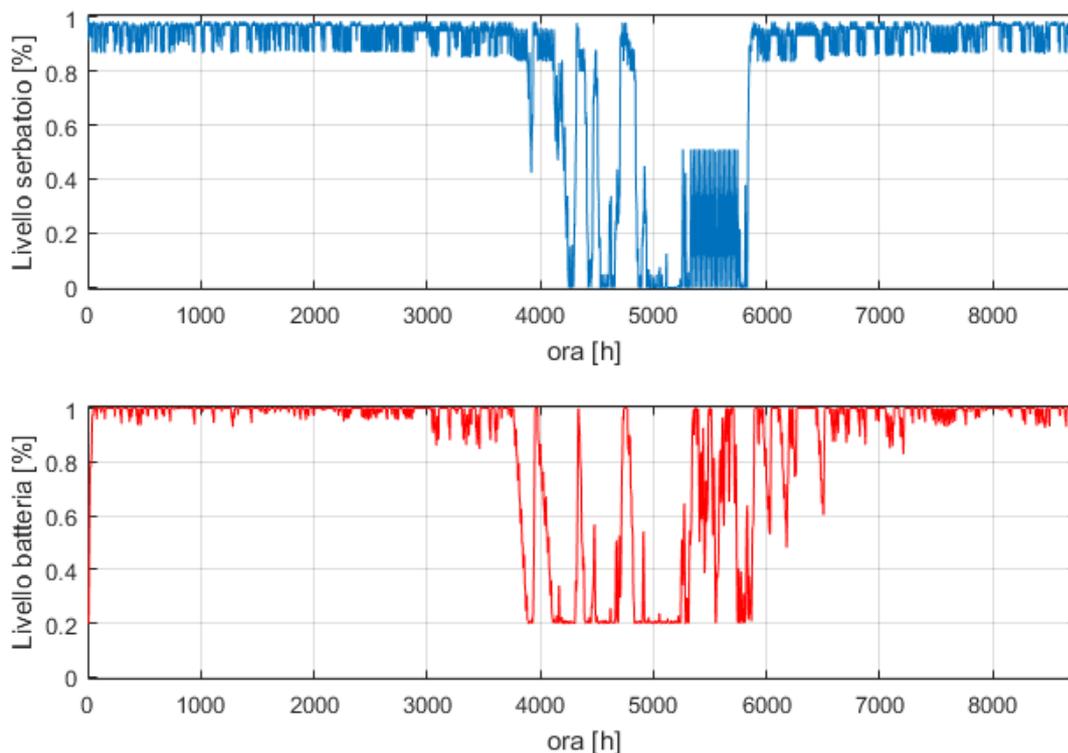


Figura 4.47. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°9

Il serbatoio si scarica completamente in estate quando la domanda idrica è molto elevata e non riesce ad essere completamente soddisfatta. In inverno invece il livello dell'acqua non scende al di sotto dell'80%. Per quanto riguarda le batterie, esse si scaricano parzialmente e si ricaricano anche d'inverno, in quanto, essendo il volume del serbatoio piccolo, il livello dell'acqua scende al di sotto del 90%.

4.4.10 Test n°10

Poiché nel test n°9 la capacità delle batterie è uguale al valore limite superiore imposto è interessante vedere quale valore assume tale variabile quando viene aumentato il limite. Per questo motivo viene ripetuta la simulazione come nel test n°9 ma assumendo come limite superiore della capacità delle batterie il valore 20000 kWh.

Tabella 4.23. Limite inferiore e limite superiore del test n°10

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	1	2
Numero moduli fotovoltaici	625	2500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	2000	2000
Capacità batterie [kWh]	5000	20000

Risultati

Tabella 4.24. Risultati del test n°10

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 [%]
200	200	10 ⁻⁵	1	2500	650	2000	20000	2.66	93.87	54

La simulazione è stata eseguita considerando pop=200 e gen=200 ed una tolleranza pari a 10⁻⁵.

Anche in questo caso la capacità delle batterie che si ottiene dall'ottimizzazione è pari al limite superiore. Aumentando tale valore però aumenta anche il costo di produzione dell'acqua, in quanto l'aumento del costo delle batterie dovuto alla maggiore capacità installata è superiore all'aumento di produzione di acqua desalinizzata. Infatti il tasso di soddisfazione del carico idrico non è molto superiore al valore assunto nel test n°9 ed è comunque inferiore al vincolo imposto di 94%, il quale anche in questo caso non viene rispettato. Aumentando ulteriormente la capacità delle batterie aumenterebbe il costo di produzione dell'acqua in modo più veloce dell'aumento del tasso di soddisfazione, perciò non sembra essere conveniente procedere in questo modo. Di seguito vengono riportati i grafici del livello dell'acqua all'interno del serbatoio ed del livello dell'energia contenuta nelle batterie. Tali grafici sono del tutto analoghi a quelli del test precedente.

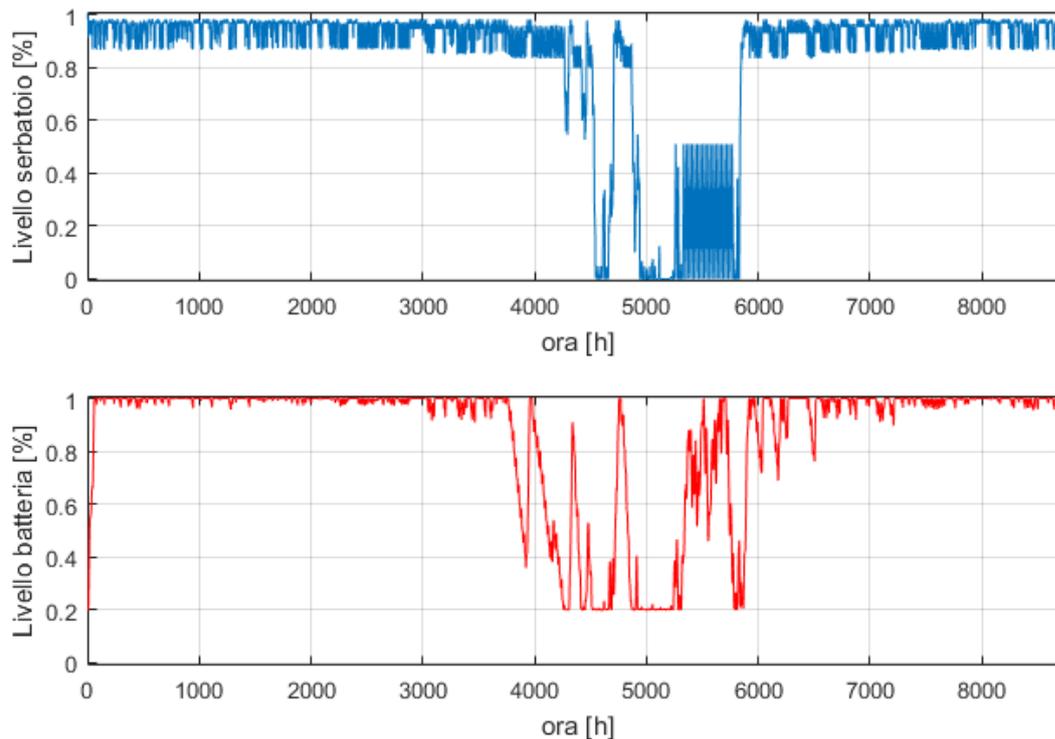


Figura 4.48. Grafici del livello dell'acqua nel serbatoio e del livello di energia della batteria del test n°10

4.5 Confronto tecnico-economico delle soluzioni

Può essere interessante fare un confronto del costo di produzione dell'acqua dissalata che è stato ottenuto nelle varie ottimizzazioni eseguite. Dunque nella tabella 4.21 vengono riportati i costi ottenuti nei diversi casi.

Poiché in quasi tutti i test il tasso di soddisfazione è inferiore al 100%, 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.

Tabella 4.25. Tabella riassuntiva dei costi

Test	F _{ds} [%]	C _{prod} [€/m ³]	C _{medio} [€/m ³]
Configurazione base	94	1.91	2.10
Test n°1	94	1.88	2.07
Test n°2	94	1.91	2.10
Test n°3	94	1.93	2.11
Test n°4	100	1.86	1.86
Test n°5	89.93	2.35	2.62
Test n°6	94	6.11	6.04
Test n°7	94	5.22	5.21
Test n°8	94	2.39	2.55
Test n°9	93	2.26	2.45
Test n°10	93.87	2.66	2.80

Come si può osservare dalla tabella il valore minimo del costo medio viene ottenuto nel test n°4, in cui il volume del serbatoio è di 56791 m³, il quale è molto elevato e ciò permette di ottenere la completa soddisfazione della domanda di acqua senza la necessità di importare la risorsa. Infatti, poiché il costo per l'importazione dell'acqua è abbastanza più elevato rispetto al costo di dissalazione, il fatto di ottenere con l'impianto di desalinizzazione una soddisfazione completa del carico idrico permette di mantenere più basso il costo medio, rendendo tale configurazione più vantaggiosa dal punto di vista economico.

Nel test n°1 si ottiene un costo di produzione un po' più elevato rispetto a quello del test n°4, ma il tasso di soddisfazione del carico idrico non è totale ma del 94%. Proprio a causa della non completa copertura della domanda di acqua è necessario importare una certa quantità della risorsa ad un prezzo più elevato, pertanto il costo medio diventa maggiore.

Nei test n°6 e n°7 in cui il costo d'investimento del serbatoio è stato aumentato di due ordini di grandezza, il costo di produzione dell'acqua è maggiore del costo d'importazione della risorsa perciò in questi casi la realizzazione di un tale impianto di dissalazione non risulterebbe essere conveniente dal punto di vista economico.

Dunque le configurazioni più vantaggiose sono quelle del test n°1 e del test n°4. Nel test n°1 il costo medio dell'acqua è più elevato di quello del test n°4 a causa della non completa copertura della domanda, che rende necessaria l'importazione della risorsa. D'altra parte nel test n°4 il volume del serbatoio è molto elevato, mentre nel test n°1 è più contenuto, cosa più vantaggiosa se si considera che maggiore è il volume del serbatoio maggiore è lo spazio richiesto per la sua installazione. Pertanto potrebbe essere preferibile installare un serbatoio di dimensioni più contenute. Poiché è difficile stabilire quale tra le due soluzioni sia migliore, viene effettuato un confronto di tipo tecnico-economico.

Le taglie dei componenti dell'impianto delle due configurazioni vengono riportate nella tabella 4.22. Si vede che l'unica variazione tra i due casi riguarda il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua: nel test n°4 il serbatoio è circa tre volte maggiore rispetto a quello del test n°1.

Tabella 4.26. Taglie dei componenti d'impianto

Parametro di progetto	Test n°1	Test n°4
Potenza imp. Eolico [kW]	800	800
Potenza imp. Fotovoltaico [kW]	758	758
Potenza imp. Desalinizzazione [kW]	636	636
Volume del serbatoio [m ³]	19400	56800
Capacità batterie [kWh]	5000	5000

Tabella 4.27. Indici tecno-economici dell'impianto

Parametro	Test n°1	Test n°4
Tasso di copertura della domanda idrica [%]	94	100
Percentuale di energia rigettata [%]	53.9	50.1
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore [%]	6.9	7.3
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico [%]	13.6	14
Fattore di capacità dell'impianto eolico [%]	14.8	16.8
Quantità di acqua prodotta [m ³ /anno]	535,356	570,961
Costo d'investimento [€]	7,980,663	8,397,325
Costi operativi e di manutenzione [€/anno]	363,259	384,622
Costo annuale dell'impianto [€/anno]	1,003,648	1,058,445
Costo di produzione dell'acqua [€/m ³]	1.88	1.86
Costo medio [€/m ³]	2.07	1.86

Nella tabella 4.23 vengono riportati i principali indici tecnico-economici sulla base dei quali vengono confrontate le due configurazioni d'impianto. Come già era stato detto nel test n°4 si riesce a soddisfare completamente la richiesta d'acqua grazie all'elevato volume del serbatoio, il quale permette di ridurre anche la percentuale di energia rigettata, perché viene consumata più energia per riempire nuovamente il serbatoio dopo che è stato svuotato.

Per quanto riguarda l'autonomia dell'impianto di dissalazione, nel test n°1 essa è pari a 4.5 giorni di agosto, mentre nel test n°4, essendo il volume del serbatoio assai maggiore, risulta essere pari a 13 giorni di agosto.

I fattori di capacità dell'impianto eolico e fotovoltaico relativi al test n°4 sono leggermente più alti, data la minore quantità di energia dissipata, tuttavia non variano in modo significativo rispetto a quelli del test n°1.

Dato il maggiore volume del serbatoio il costo d'investimento di tutto l'impianto è più elevato nel test n°4, ma, poiché il volume d'acqua dissalata è maggiore, il costo di produzione è più basso. Sebbene il costo di produzione dell'acqua dissalata non sia poi così diverso nei due casi, i costi medi differiscono di circa 0.20 €. Il costo medio più elevato è quello relativo al test n°1 perché il tasso di soddisfazione del carico idrico è più basso e ciò richiede l'importazione di una certa quantità d'acqua, che presenta un costo abbastanza più elevato.

Il costo di tutto l'impianto sostenuto in un anno di esercizio viene calcolato mediante la relazione:

$$costo\ annuo = IC_{tot} \cdot \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} + OM_{tot}$$

Per la configurazione relativa al test n°4 il costo che viene sostenuto in un anno è più elevato di quello del test n°1 di 54797 €.

In conclusione nei due casi riportati i risultati in termini di costo non sono molto diversi tra loro, tuttavia potrebbe essere preferibile installare un serbatoio di dimensioni più contenute, perché richiede meno spazio e presenta un minor impatto visivo. È importante tener conto anche di questi fattori dal momento che il luogo di installazione dell'impianto studiato è un'isola della Grecia, dove è presente molto turismo, perciò un serbatoio troppo grande potrebbe deturpare il paesaggio. Infine considerando la configurazione d'impianto relativa al test n°1 si consegue un costo d'investimento più basso ed i risultati ottenuti sono comunque buoni.

Capitolo V

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

In questo capitolo viene descritta l'ottimizzazione della configurazione d'impianto in cui l'energia elettrica prodotta è usata sia per dissalare l'acqua di mare, sia per soddisfare il fabbisogno elettrico degli abitanti dell'isola in cui è installato tale impianto. Vengono quindi discussi i risultati ottenuti e confrontati con la configurazione d'impianto del capitolo precedente, al fine di comprendere quale delle due configurazioni possa essere più conveniente dal punto di vista tecnico-economico.

5.1 Ottimizzazione dell'impianto

La configurazione d'impianto che si vuole ottimizzare è quella in cui viene desalinizzata l'acqua di mare e prodotta energia elettrica. Come è già stato visto nei capitoli precedenti, in questa configurazione, a differenza della configurazione d'impianto in cui viene solamente dissalata l'acqua di mare, si utilizza anche un generatore diesel ausiliario.

Nel capitolo III sono state analizzate due tipologie di configurazione d'impianto: una in cui il generatore diesel viene utilizzato per coprire la parte di carico elettrico che non viene soddisfatta dagli impianti a fonte rinnovabile, l'altra in cui il generatore diesel entra in funzione quando la batteria raggiunge il livello minimo, lavorando a carico nominale, e fornisce energia sia al carico elettrico sia all'impianto di desalinizzazione, mentre l'eccesso di energia viene accumulato nella batteria.

Come è stato visto la prima di queste due configurazioni permette di ottenere la copertura totale del carico elettrico, ma è necessario che la potenza nominale del generatore diesel sia pari al carico di picco (3175 kW) con un fattore di capacità di circa 6%. La seconda configurazione, invece, permette di ottenere buoni risultati con valori più bassi di potenza nominale del generatore diesel (nel caso studiato la potenza nominale era di 1000 kW). Pertanto quest'ultima configurazione risulta essere più interessante e per tale motivo si è scelto di effettuare l'ottimizzazione solo su di essa.

L'algoritmo utilizzato per l'ottimizzazione è lo stesso che è stato descritto nel capitolo IV.

5.1.1 Funzione di fitness

L'ottimizzazione si pone come obiettivo l'individuazione delle taglie dei vari componenti d'impianto che massimizzano il valore attuale netto dell'investimento (VAN).

Le variabili di ottimizzazione sono:

6. il numero di turbine eoliche, ciascuna di potenza nominale di 800 kW;
7. il numero di moduli fotovoltaici, ognuno dei quali ha una potenza di picco di 320 W;
8. la potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa;
9. il volume del serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua desalinizzata;
10. la capacità totale delle batterie di accumulo dell'energia;
11. la potenza nominale del generatore diesel.

La funzione di fitness viene realizzata in modo tale da ricevere in ingresso un vettore x , le cui componenti rappresentano le variabili di ottimizzazione, e restituire in uscita il valore attuale netto dell'investimento. La realizzazione di questa funzione di fitness è del tutto analoga a quella descritta nel capitolo IV per l'ottimizzazione dell'impianto di sola desalinizzazione, ma in questo caso l'obiettivo è diverso.

Innanzitutto vengono dichiarate le variabili di ottimizzazione, poi vengono inserite le equazioni necessarie per effettuare la simulazione del comportamento dell'impianto durante un intero anno. Successivamente vengono inseriti i costi d'investimento ed i costi operativi e di manutenzione relativi a tutti i componenti d'impianto, in modo tale da poter effettuare il calcolo del valore attuale netto dell'investimento, il quale è dato dalla seguente relazione:

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

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 a 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 0.88 €/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 nel capitolo II. 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 1.16 €/l.

Infine, nella realizzazione della funzione di fitness è da tenere in considerazione che, poiché l'algoritmo utilizzato permette di effettuare la sola minimizzazione della funzione obiettivo, è stato necessario minimizzare la funzione opposta al VAN.

5.1.2 Limiti delle variabili di ottimizzazione

A ciascuna variabile di ottimizzazione vengono dati dei limiti entro i quali poter variare. Per il numero di turbine eoliche viene scelto come limite inferiore il valore 0 (nessuna turbina eolica installata) e come limite superiore il valore 5, a cui corrisponde una potenza installata dell'impianto eolico di 4000 kW. Inserendo il carico elettrico a cui corrisponde una potenza di picco pari a 3175 kW e sommando la potenza nominale dell'impianto di dissalazione, che indicativamente potrebbe essere di circa 500 kW, si ottiene un valore totale di potenza di picco pari a circa 3675 kW. Dunque si è scelto come limite superiore del numero di turbine eoliche il valore 5, perché data la presenza anche dell'impianto fotovoltaico non si vuole ottenere una potenza installata degli impianti a fonte rinnovabile troppo elevata rispetto ai carichi.

Il numero di moduli fotovoltaici viene fatto variare tra 625 e 10000, che equivale in termini di potenza all'intervallo 200-3200 kW.

I limiti relativi alla potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa sono gli stessi che sono stati considerati nell'ottimizzazione dell'impianto di sola desalinizzazione (capitolo IV), ovvero 480-650 kW.

Il volume del serbatoio viene fatto variare tra 8500 m³, valore a cui corrisponde un'autonomia nella fornitura di acqua dissalata pari a due giorni di agosto, e 20000 m³, valore prossimo a quello ottimale dell'impianto di sola dissalazione derivante dall'ottimizzazione descritta nel capitolo IV.

Per la capacità delle batterie viene scelto l'intervallo 5000-14000 kWh.

Il limite superiore della potenza nominale del generatore diesel viene assunto pari a 3175 kW, che rappresenta la potenza di picco del carico elettrico. Il limite inferiore, invece, viene assunto pari a 500 kW, in modo tale che il generatore abbia una potenza sufficiente ad alimentare almeno l'impianto di dissalazione in assenza di disponibilità delle fonti rinnovabili ed in condizione di batteria scarica.

I limiti delle sei variabili di ottimizzazione sono riassunti nella seguente tabella.

Tabella 5.28. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	10000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	14000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500	3175

Infine ognuna delle variabili di ottimizzazione può assumere solamente valori interi e questo è stato specificato all'interno del comando per eseguire l'algoritmo.

5.1.3 Vincoli non lineari

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

Si stabilisce che i primi due indici debbano essere compresi tra 95% e 100%, perché si vuole mantenere elevata la copertura sia del carico idrico sia di quello elettrico.

Si vuole invece che la percentuale di energia rigettata sia inferiore al 35%: 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.

5.1.4 Parametri prestazionali dell'algoritmo

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

- Popolazione pari a 200;
- Numero di generazioni pari a 200;
- 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} .

5.1.5 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 calcolo dei costi di produzione dell'acqua dissalata e dell'energia sono già stati presentati nel capitolo II, come pure le equazioni relative al calcolo del tasso di soddisfazione del carico idrico, del carico elettrico e la percentuale di energia rigettata.

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:

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

5.2 Risultati dell'ottimizzazione

In tabella 5.2 vengono riportati i valori delle variabili che si ottengono dal processo di ottimizzazione considerando i limiti ed i vincoli descritti precedentemente.

Il VAN, che rappresenta l'indice che l'algoritmo di ottimizzazione deve massimizzare, viene riportato in tabella 5.3, insieme agli altri indici tecnico-economici che sono stati adottati per la valutazione dei risultati dell'ottimizzazione.

Tabella 5.29. Risultati delle variabili di ottimizzazione

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	2
Numero moduli fotovoltaici	9998
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	645
Volume serbatoio [m ³]	19576
Capacità batterie [kWh]	13561
Potenza nominale generatore diesel [kW]	512

Tabella 5.30. Risultati degli indici tecnico-economici

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
2.08	0.27	2.22	62,549,443	37.67	96.82	95	34.36

Come si può osservare il numero di moduli fotovoltaici è prossimo al limite superiore, cosa che indica che aumentando tale limite il valore ottimo di questa variabile potrebbe spostarsi verso valori maggiori. La potenza nominale dell'impianto eolico è pari a 1600 kW, mentre quella dell'impianto fotovoltaico è pari a circa 3200 kW, quindi complessivamente la potenza totale installata degli impianti a fonte rinnovabile è di 4800 kW. Considerando che la potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa è di 645 kW e che la potenza di picco del carico elettrico è pari a 3175 kW, il sovradimensionamento degli impianti di produzione dell'energia è pari a circa il 26%.

Anche il volume del serbatoio assume un valore molto vicino al suo limite superiore, come ci si aspettava perché lo stesso è accaduto nell'ottimizzazione dell'impianto con sola desalinizzazione. Con tale volume l'autonomia di fornitura di acqua dissalata è di circa 4.5 giorni di agosto. La capacità delle batterie è anch'essa vicina al valore limite, cosa che invece non accadeva nell'ottimizzazione dell'impianto con sola desalinizzazione. Inserendo il carico elettrico la batteria viene utilizzata sia per fornire energia all'impianto di osmosi inversa sia per fornire energia al carico elettrico, perciò è necessario un valore di capacità maggiore per accumulare più energia limitando il sovradimensionamento degli impianti alimentati da fonte rinnovabile.

La potenza nominale del generatore diesel è di 512 kW, valore prossimo al limite inferiore: forse, diminuendo tale limite, il valore ottimo di questa variabile diventerebbe più basso.

Con questi valori delle variabili di ottimizzazione il costo di produzione dell'acqua è pari a 2.08 €/m³ mentre il costo di produzione dell'energia è pari a 0.27 €/kWh. Il costo di produzione dell'acqua in questo caso è maggiore del costo che era stato ottenuto con l'impianto in cui veniva solamente dissalata l'acqua di mare, ovvero 1.88 €/m³. Questa differenza è dovuta principalmente al fatto che nell'impianto che si sta analizzando i costi relativi al generatore diesel (costo d'investimento, costi di manutenzione e costo del combustibile) vengono in parte attribuiti anche alla dissalazione dell'acqua. Il costo di produzione dell'energia è inferiore del 69% rispetto al costo che si otterrebbe se il carico elettrico venisse soddisfatto solamente dal generatore diesel, è però da tenere in considerazione che nel caso che si sta analizzando il tasso di copertura del carico elettrico non è totale ma è pari a 95%.

Il tasso di soddisfazione della domanda idrica è quasi del 97%, circa tre punti percentuali maggiore rispetto al valore che si otteneva con l'impianto in cui veniva solamente dissalata l'acqua di mare. La percentuale di energia rigettata è pari al 34%, valore più basso di venti punti percentuali rispetto alla configurazione d'impianto riportata nel capitolo IV. Ciò indica che un impianto come quello che si sta analizzando in questo capitolo permette di utilizzare in maniera migliore l'energia prodotta, riducendo le dissipazioni.

In figura 5.1 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. Come si può osservare dal primo grafico il generatore diesel funziona soprattutto d'estate quando sia il carico elettrico sia la domanda idrica sono massimi. In questo periodo il sistema di batterie raggiunge frequentemente il livello minimo a causa dell'elevata richiesta di energia. Il grafico relativo all'energia contenuta nelle batterie è molto diverso da quello dell'impianto di sola desalinizzazione, riportato nel capitolo precedente. Infatti in questo caso le batterie si scaricano e si ricaricano durante tutto l'anno, perché è presente anche il carico elettrico, che deve essere soddisfatto istantaneamente, quindi, qualora l'energia generata dagli impianti a fonte rinnovabile non fosse sufficiente, le batterie forniscono l'energia mancante.

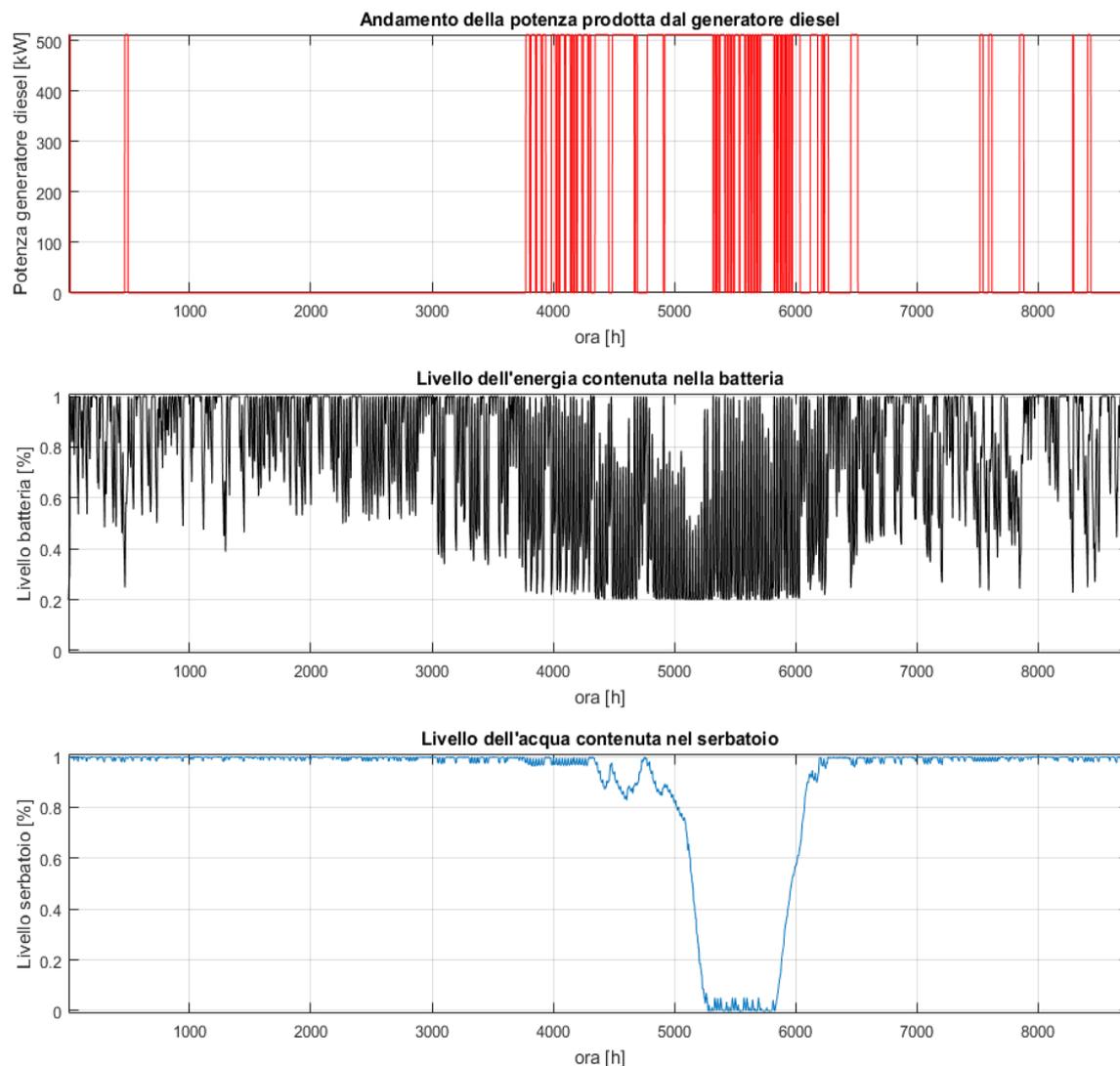


Figura 5.49. Grafici relativi all'ottimizzazione

L'andamento del livello dell'acqua nel serbatoio è abbastanza simile a quello ottenuto con l'impianto di sola desalinizzazione. Infatti anche in questo caso il serbatoio in inverno è quasi del tutto pieno, mentre in estate, quando la domanda idrica è massima, esso inizia a svuotarsi fino a scaricarsi completamente nell'intervallo 5000-6000 h. In questo periodo si possono notare delle minime oscillazioni del livello dell'acqua, in quanto l'impianto di dissalazione continua a funzionare ma non riesce a produrre una quantità d'acqua sufficiente a riempire il serbatoio a causa dell'elevata domanda idrica. Infatti tale domanda è così elevata che l'impianto non riesce a coprirla completamente, perciò parte della portata d'acqua richiesta non viene soddisfatta, come si può osservare dalla figura 5.2.

In figura 5.2 infatti vengono riportati i grafici relativi alla portata d'acqua non soddisfatta e al carico elettrico non soddisfatto. Si può notare che sia parte della domanda idrica, sia

parte del carico elettrico rimangono scoperti nel periodo estivo, durante il quale le due curve di carico raggiungono i valori massimi.

Il valore massimo della portata d'acqua non soddisfatta è pari a 314.5 m³/h che rappresenta anche il valore massimo della domanda idrica: ciò significa che in alcune ore non si riesce a soddisfare la domanda idrica perché il serbatoio è completamente scarico e la produzione di acqua desalinizzata è nulla.

Il valore massimo del carico elettrico non soddisfatto è pari a 2412 kW, che risulta essere inferiore al carico elettrico di picco, corrispondente a 3175 kW: ciò significa che una parte del carico elettrico viene sempre soddisfatta anche se non completamente.

Nonostante parte del carico idrico e del carico elettrico non vengano soddisfatti la percentuale di copertura dei carichi è comunque abbastanza elevata, ossia 96.82% per la domanda idrica e 95% per il carico elettrico.

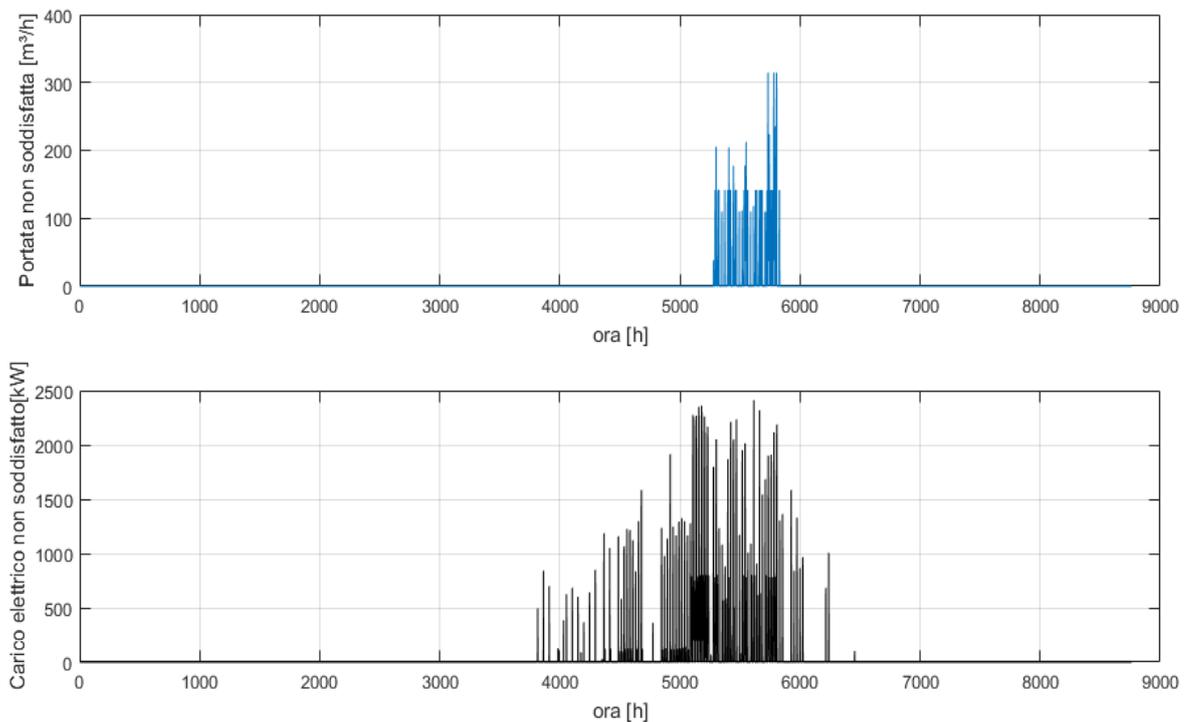


Figura 5.50. Grafici della portata d'acqua non soddisfatta e del carico elettrico non soddisfatto

5.3 Analisi di sensibilità

Nell'ottimizzazione effettuata molte variabili hanno assunto valori prossimi ai limiti imposti, perciò sono state eseguite altre simulazioni variando uno alla volta i limiti delle variabili di ottimizzazione. Lo scopo è quello di capire se i limiti che sono stati imposti siano troppo restrittivi e quindi vedere se, ampliando i domini delle variabili, si possano trovare altre soluzioni migliori. In questo paragrafo vengono esposti i risultati di queste

simulazioni allo scopo di individuare la soluzione ottimale. Tutte le simulazioni sono state effettuate considerando una popolazione pari a 200, numero di generazioni pari a 200 ed una tolleranza di 10^{-5} .

Per praticità la soluzione ottenuta nell'ottimizzazione descritta nel paragrafo precedente verrà chiamata "configurazione base", mentre le soluzioni delle altre simulazioni esposte in questo paragrafo verranno definite "test".

5.3.1 Test n°1

Poiché nella configurazione base il numero di moduli fotovoltaici è molto prossimo al limite superiore, è stato deciso di aumentare tale limite in modo da considerare un intervallo di variazione abbastanza ampio. I limiti delle altre variabili di ottimizzazione sono stati mantenuti invariati rispetto alla configurazione base.

Tabella 5.31. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°1

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	100000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	14000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500	3175

Risultati

Tabella 5.32. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°1

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	2
Numero moduli fotovoltaici	10331
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	649
Volume serbatoio [m ³]	19687
Capacità batterie [kWh]	13698
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500

Tabella 5.33. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°1

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
2.07	0.27	2.24	62,745,396	37.41	97	95	35

In questa simulazione il numero dei moduli fotovoltaici è 10331 (corrispondente a 3306 kW), cioè 333 moduli in più rispetto alla simulazione precedente (ovvero 106 kW aggiuntivi). Dunque, aumentando il limite superiore di tale variabile, si ottiene un aumento del 3% del numero di moduli fotovoltaici, nonché di potenza installata dell'impianto fotovoltaico. I valori ottimali assunti dalle altre variabili non si discostano di molto da quelli della simulazione precedente, infatti anche i risultati degli indici tecnico-economici sono molto simili. Il costo dell'acqua è inferiore di un centesimo, mentre il costo dell'energia è il medesimo. Il VAN è leggermente maggiore (dello 0.3%) rispetto alla configurazione base, mentre i tassi di copertura del carico idrico e del carico elettrico e la percentuale di energia rigettata sono pressoché uguali.

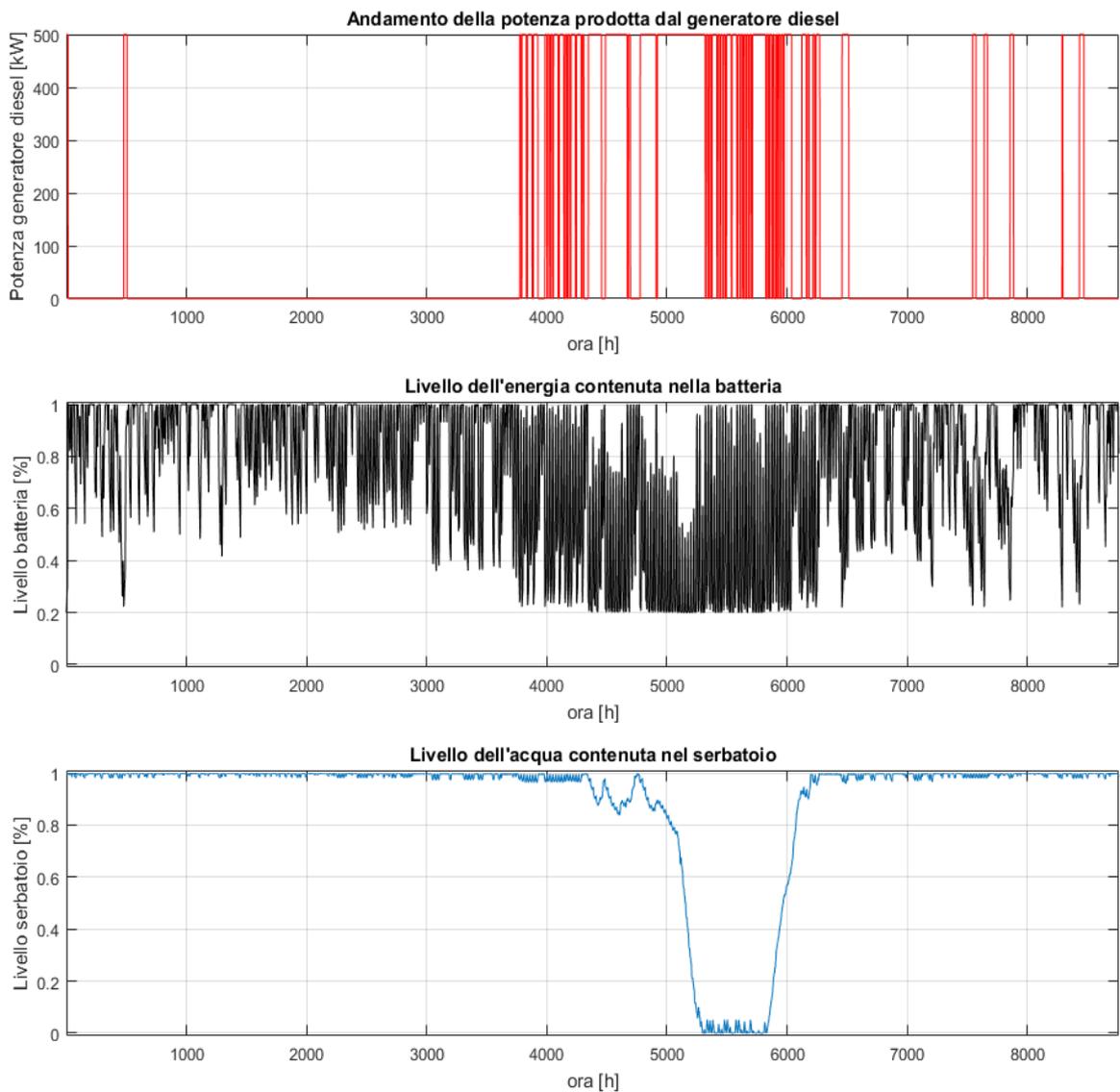


Figura 5.51. Grafici relativi al test n°1

In figura 5.3 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello di energia contenuta nelle batterie e del livello dell'acqua nel serbatoio. Essi sono del tutto analoghi a quelli del caso precedente.

5.3.2 Test n°2

Nelle simulazioni precedenti il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua dissalata ha assunto sempre valori molto prossimi al limite superiore, perciò si è pensato di aumentare tale limite fino a 200000 m³. Il limite del numero di moduli fotovoltaici è stato assunto pari a 20000, maggiore rispetto al caso base ma inferiore rispetto al test n°1: è stato scelto questo valore per non limitare il valore ottimale di tale variabile, considerando però un intervallo di variazione più limitato. Le altre variabili presentano gli stessi limiti del caso base.

Tabella 5.34. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°2

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	200000
Capacità batterie [kWh]	5000	14000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500	3175

Risultati

Tabella 5.35. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°2

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	2
Numero moduli fotovoltaici	10801
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	531
Volume serbatoio [m ³]	59698
Capacità batterie [kWh]	13963
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500

Tabella 5.36. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°2

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
2.06	0.27	2.23	63,959,208	37.68	100	96	34

In questa simulazione il volume del serbatoio è aumentato di circa tre volte rispetto alla configurazione base, perciò l'autonomia di fornitura di acqua dissalata è pari a 14 giorni di agosto.

Si vede che invece, aumentando il volume del serbatoio, la potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa è diminuita del 18% rispetto al caso base.

Il numero di moduli fotovoltaici è superiore sia al valore assunto nel caso base, sia nel test n°1: tale aumento è dell'8% rispetto al caso base e del 4.5% rispetto al test n°1. I valori delle altre variabili rimangono pressoché invariati.

Il costo di produzione dell'acqua dissalata è calato di due centesimi rispetto alla configurazione base, mentre il costo dell'energia è il medesimo. Il VAN è aumentato di circa il 2.3%. Grazie all'elevato volume del serbatoio il tasso di copertura della domanda idrica è totale. Il tasso di copertura del carico elettrico è aumentato di un solo punto percentuale, mentre la percentuale di energia rigettata rimane pressoché invariata rispetto al caso base.

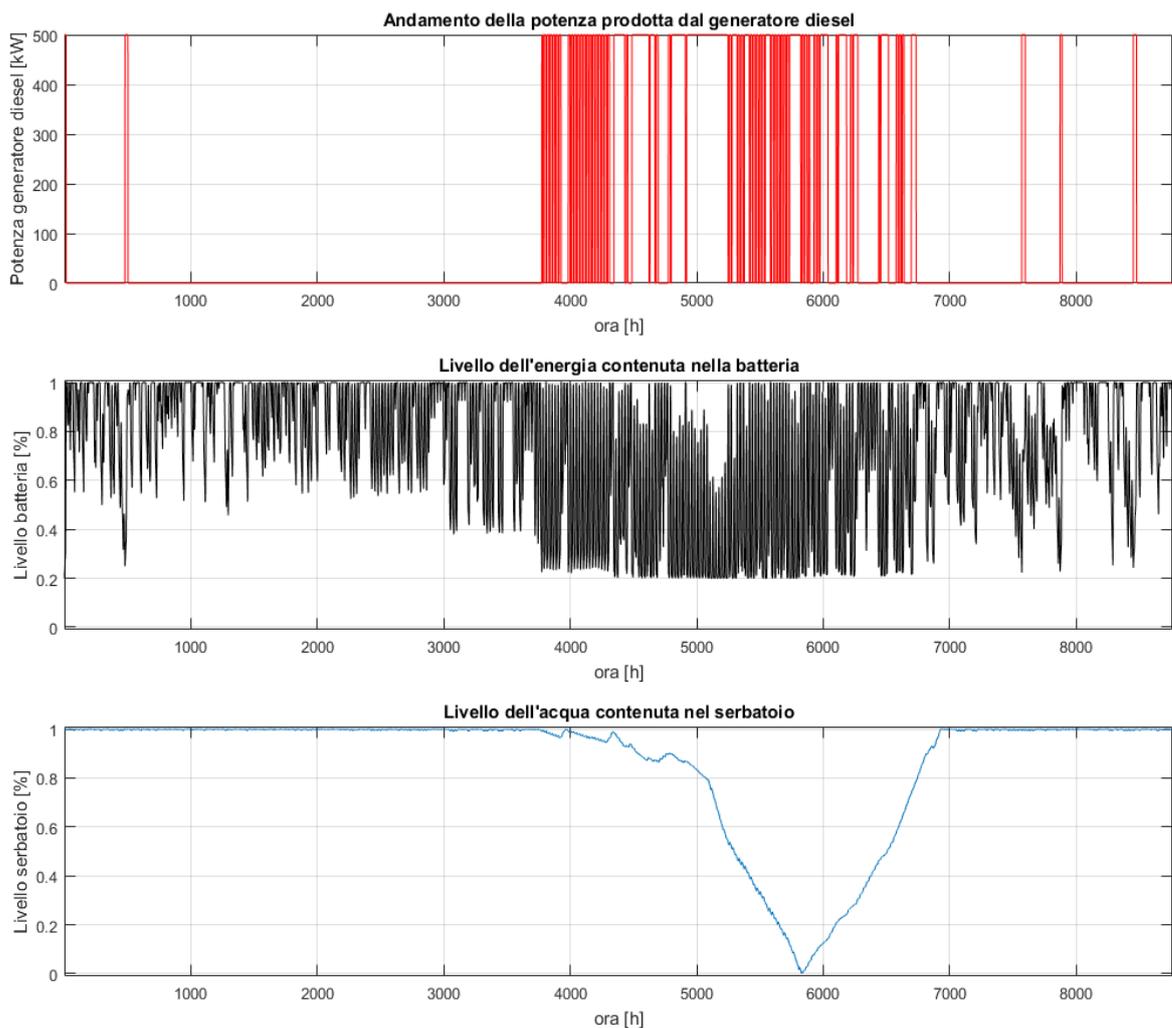


Figura 5.52. Grafici relativi al test n°2

Si osserva quindi che con un volume del serbatoio molto grande è possibile ottenere la copertura totale della domanda idrica, tuttavia un serbatoio così grande sembra essere eccessivo per un'isola di 5000 abitanti (anche se in estate la popolazione raddoppia a causa del turismo).

In figura 5.4 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello di energia contenuta nelle batterie e del livello dell'acqua nel serbatoio. La differenza principale che si può notare rispetto alle simulazioni precedenti risiede nel fatto che il serbatoio si scarica completamente solo una volta, riuscendo sempre a garantire la soddisfazione della domanda idrica. Inoltre dato l'elevato volume esso impiega più tempo sia a scaricarsi sia a ricaricarsi. Esso inizia a scaricarsi intorno a 5000 h, come negli altri casi, ma raggiunge nuovamente il massimo livello a circa 7000 h, mentre nelle simulazioni precedenti tornava ad essere completamente pieno già a 6200 h.

5.3.3 Test n°3

In tutte le simulazioni precedenti la capacità delle batterie ha assunto sempre valori molto prossimi al limite superiore, perciò è stato aumentato tale limite per vedere se in questo modo la capacità delle batterie potesse assumere un valore ottimale maggiore. È stato assunto come limite del numero di moduli fotovoltaici quello della simulazione precedente, in modo tale da non influenzare il valore di tale variabile. Le altre variabili presentano gli stessi limiti della configurazione base.

Tabella 5.37. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°3

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	20000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500	3175

Risultati

Tabella 5.38. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°3

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	1
Numero moduli fotovoltaici	13400
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	645
Volume serbatoio [m ³]	19988
Capacità batterie [kWh]	15794
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500

Tabella 5.39. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°3

Costo acqua [€/m³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
2.09	0.28	2.36	62,629,596	35.67	96.7	96	29

L'aumento del limite superiore relativo alla capacità delle batterie ha dato come risultato un aumento del valore ottimale di tale variabile, che però si mantiene abbastanza più basso rispetto al limite superiore imposto.

Inoltre il numero di moduli fotovoltaici è maggiore rispetto al valore ottenuto in tutte le simulazioni precedenti e ad esso corrisponde una potenza installata dell'impianto fotovoltaico di 4288 kW. Pertanto, essendo il valore ottimale del numero di turbine eoliche pari ad uno, la potenza nominale totale degli impianti eolico e fotovoltaico corrisponde a 5088 kW: il sovradimensionamento degli impianti a fonte rinnovabile è pari al 33% della somma del carico elettrico di picco e della potenza nominale dell'impianto di dissalazione.

La potenza nominale del generatore diesel è pari al limite inferiore, perciò sarebbe interessante provare a diminuire tale limite.

Sia il costo di produzione dell'acqua sia dell'energia sono aumentati di un centesimo rispetto al caso base, mentre il VAN è più basso dello 0.13%. Il TIR si è abbassato di due punti percentuali.

I tassi di soddisfazione della domanda idrica e del carico elettrico sono simili ai valori ottenuti nel caso base. La percentuale di energia rigettata presenta il valore più basso raggiunto, perché, essendo aumentata la capacità delle batterie, viene accumulata una quantità maggiore di energia che prima invece veniva rigettata all'esterno.

In figura 5.5 vengono riportati i grafici relativi della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello di energia contenuta nelle batterie e del livello dell'acqua nel serbatoio. Non si notano differenze sostanziali rispetto ai grafici relativi al caso base. Però si può notare che in questa simulazione il generatore diesel durante la stagione invernale si accende solamente due volte, mentre nella configurazione base in inverno lavorava per un maggior numero di ore, anche se l'utilizzo prevalente era sempre concentrato nei mesi estivi. Ciò è dovuto alla maggiore capacità delle batterie: l'energia contenuta in esse nel periodo invernale è quasi del tutto sufficiente a soddisfare i carichi.

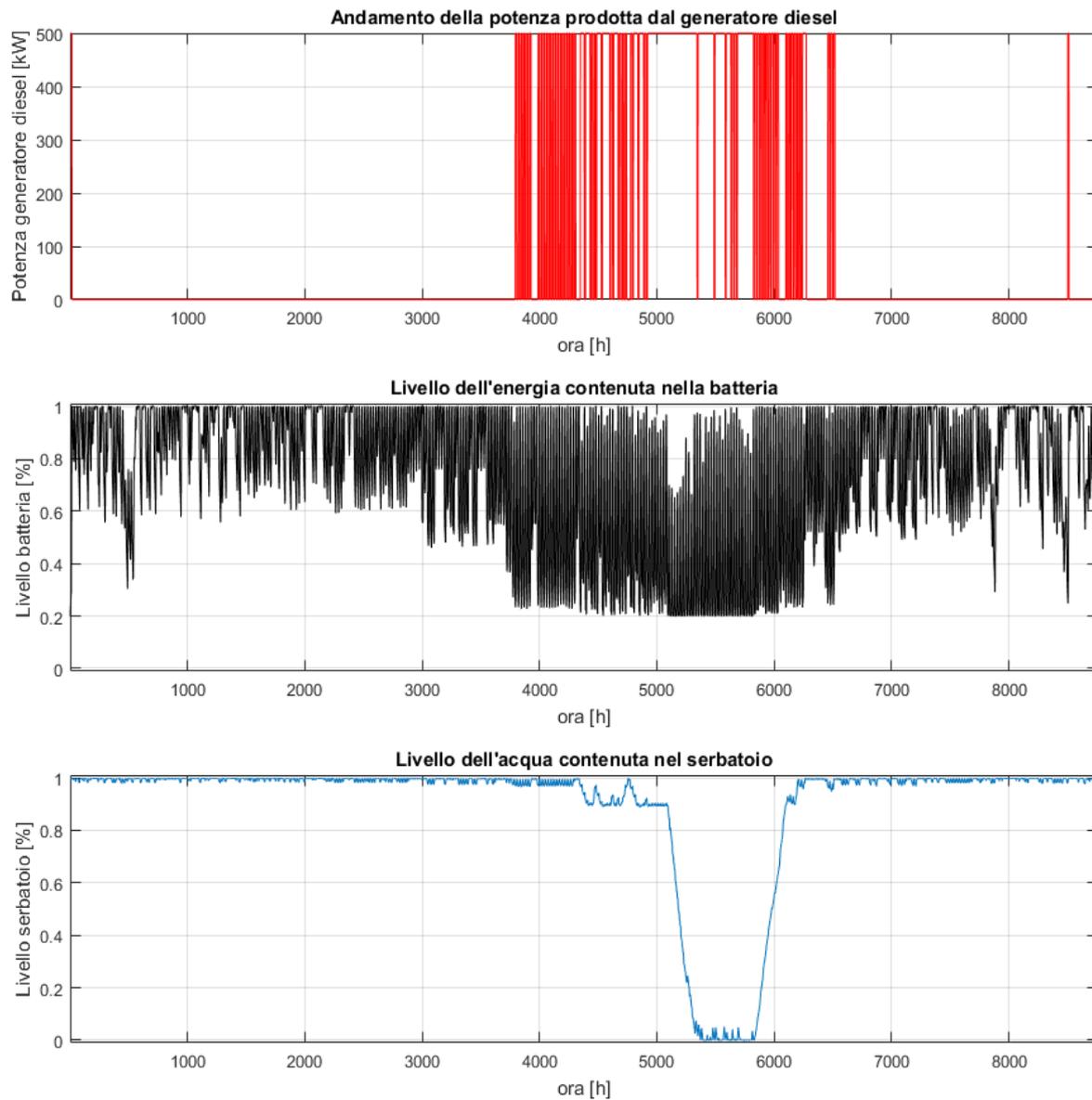


Figura 5.53. Grafici relativi al test n°3

5.3.4 Test n°4

Poiché nelle simulazioni precedenti il valore ottimale della potenza nominale del generatore diesel era sempre prossimo o uguale al limite inferiore, è stato deciso di abbassare tale limite. Per le altre variabili sono stati considerati gli stessi limiti del test precedente.

Tabella 5.40. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°4

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	20000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	0	3175

Risultati

Tabella 5.41. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°4

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	1
Numero moduli fotovoltaici	16565
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	579
Volume serbatoio [m ³]	19995
Capacità batterie [kWh]	19049
Potenza nominale generatore diesel [kW]	177

Tabella 5.42. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°4

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.93	0.24	2.62	65,466,855	34.32	95	95	35

Il valore ottimale del numero di turbine eoliche è pari ad 1, quindi la potenza installata dell'impianto eolico è pari a 800 kW. Il numero dei moduli fotovoltaici è aumentato rispetto alle simulazioni precedenti e perciò l'impianto fotovoltaico ha raggiunto una potenza installata pari a 5300 kW. Dunque la potenza installata degli impianti a fonte rinnovabile è pari a 6100 kW: sapendo che la potenza di picco del carico elettrico è 3175 kW e che la potenza nominale dell'impianto di dissalazione è pari a 579 kW, il sovradimensionamento degli impianti di produzione di energia è pari al 62% della somma delle potenze di picco del carico elettrico e dell'impianto di osmosi inversa.

Il volume del serbatoio è pressoché uguale al limite superiore. Anche la batteria raggiunge un valore elevato prossimo al limite superiore, mentre la potenza nominale del generatore diesel si è abbassata raggiungendo il valore di 177 kW. Questo abbassamento probabilmente è dovuto al fatto che la produzione di energia mediante il generatore diesel è molto costosa a causa del costo del combustibile. Pertanto risulta più conveniente

aumentare la potenza installata degli impianti a fonte rinnovabile e la capacità delle batterie e diminuire la potenza nominale del generatore diesel.

Il costo di dissalazione dell'acqua è pari a 1.93 €/m³, inferiore di circa il 7% rispetto al costo ottenuto nel caso base; il costo di produzione dell'energia si è abbassato di tre centesimi.

Il VAN che si ottiene è maggiore di circa il 4.7% rispetto al caso base, mentre il tasso interno di rendimento è inferiore di circa tre punti percentuali.

I tassi di soddisfazione della domanda idrica e del carico elettrico raggiungono il valore minimo consentito dai vincoli imposti, mentre la percentuale di energia rigettata presenta il valore massimo permesso.

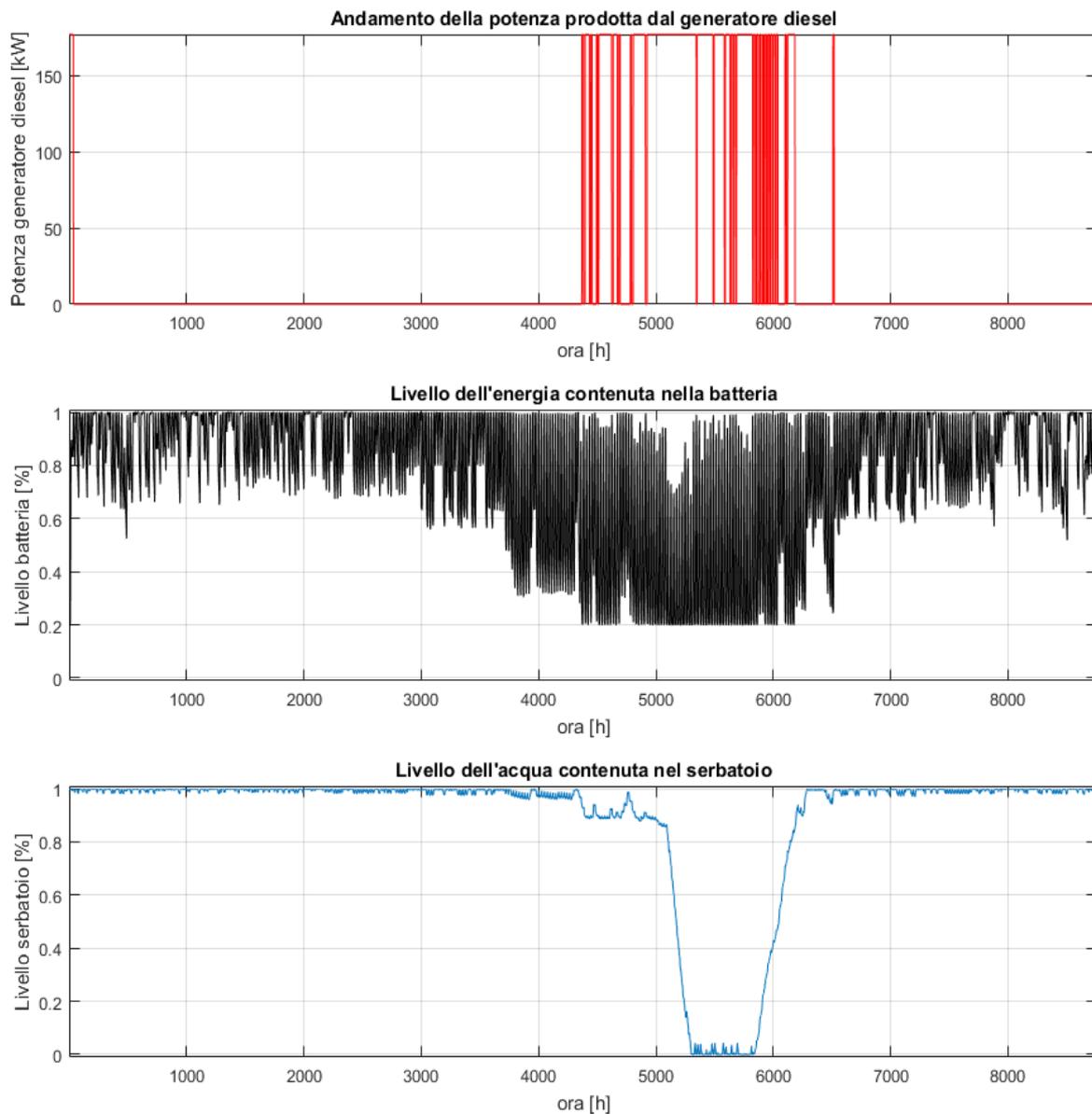


Figura 5.54. Grafici relativi al test n°4

In figura 5.6 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello di energia contenuta nelle batterie e del livello dell'acqua nel serbatoio. Come si può notare il generatore diesel lavora di meno rispetto al caso base. Infatti, essendo aumentata la potenza degli impianti a fonte rinnovabile ed essendo invece diminuita la potenza del generatore diesel, quest'ultimo componente risulta essere utilizzato in misura minore. Gli altri due grafici sono abbastanza simili ai corrispondenti del caso base.

5.3.5 Test n°5

È stato osservato che nei test precedenti il serbatoio si scarica completamente solo in estate, quando la domanda idrica è più elevata. Al termine di questo periodo il serbatoio si ricarica completamente e perciò la maggior parte dell'acqua prodotta viene poi utilizzata dopo molti mesi. Per evitare che ci sia un così ampio periodo di tempo tra produzione ed utilizzo dell'acqua è stato eseguito un test in cui viene forzato lo scarico del serbatoio anche nel periodo invernale. Per ottenere questo è stata aumentata la richiesta d'acqua relativa al mese di gennaio, ponendola uguale a quella del mese di agosto.

Tuttavia questo test non è un'ottimizzazione, perché sono state considerate le stesse taglie dei componenti d'impianto ottenute nel test n°2. Lo scopo infatti è quello di osservare il comportamento del serbatoio quando viene forzato a scaricarsi anche nel periodo invernale.

I valori delle taglie dei componenti d'impianto ed i risultati di questa simulazione vengono riassunti nelle tabelle 5.16 e 5.17.

Tabella 5.43. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°5

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	2
Numero moduli fotovoltaici	10801
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	531
Volume serbatoio [m ³]	59698
Capacità batterie [kWh]	13963
Potenza nominale generatore diesel [kW]	500

Tabella 5.44. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°5

Costo acqua [€/m³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.96	0.26	2.08	69,362,579	40.21	100	95.7	31

I risultati si discostano da quelli del test n°2, perché la curva della domanda idrica è diversa.

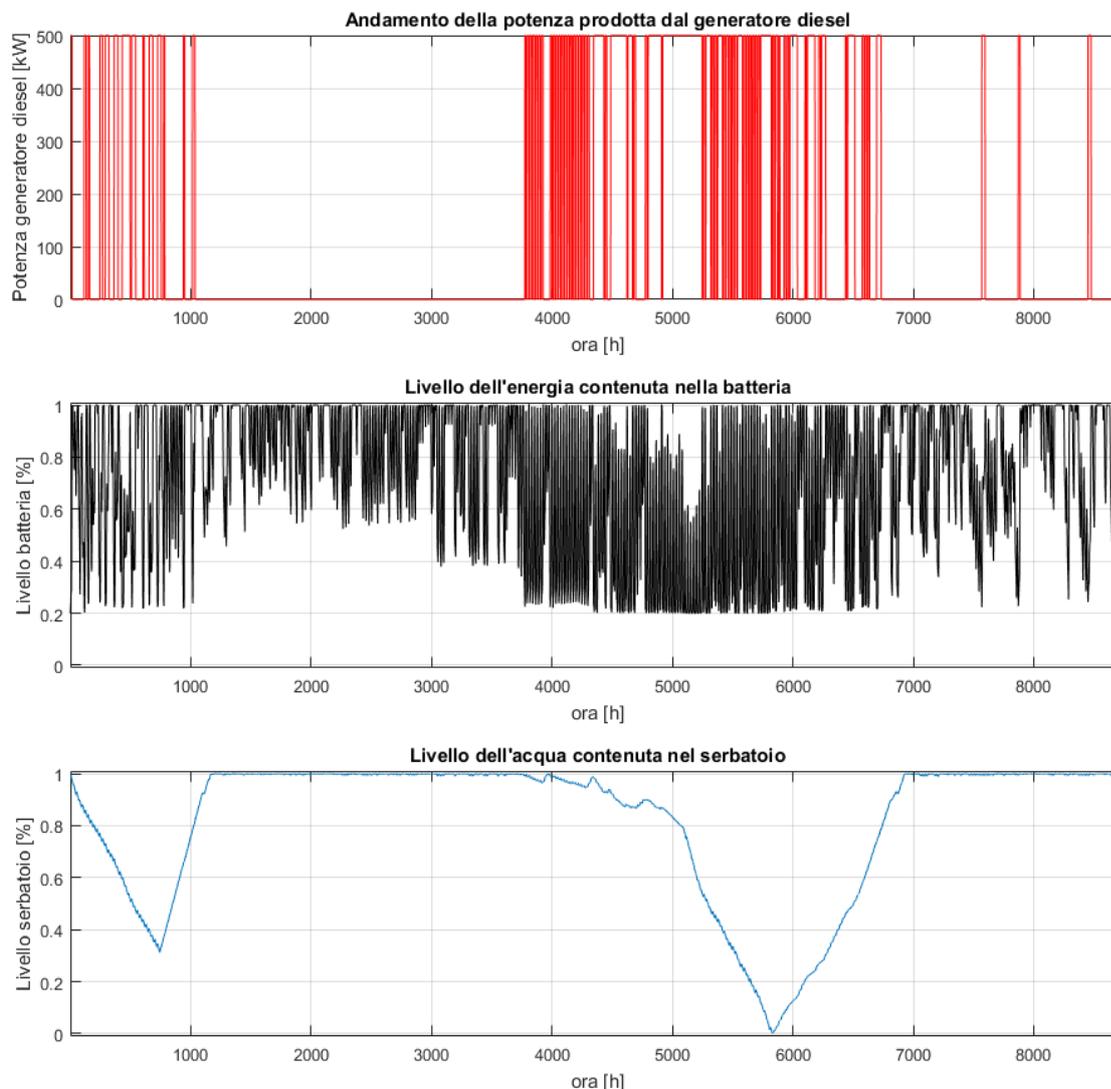


Figura 5.55. Grafici relativi al test n°5

In figura 5.7 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello dell'energia nelle batterie e del livello dell'acqua contenuta nel serbatoio.

Dal grafico relativo al livello dell'acqua si può notare che, avendo aumentato la richiesta d'acqua del mese di gennaio, nel periodo invernale il serbatoio si svuota fino a raggiungere circa il 30%. Terminato il mese di gennaio la domanda idrica si abbassa ed, essendo maggiore la produzione rispetto alla richiesta d'acqua, il serbatoio inizia a ricaricarsi.

Si nota anche che a gennaio la batteria si scarica fino a raggiungere il livello minimo, perché fornisce energia anche all'impianto di dissalazione dal momento che il livello del

serbatoio è inferiore al 90%, valore al di sotto del quale la batteria entra in funzione per fornire energia all'impianto di dissalazione.

Infine, nel periodo invernale in cui è stata aumentata la domanda idrica, lavora anche il generatore diesel dato l'elevata richiesta di energia di questo mese.

5.3.6 Test n°6

Questo test è del tutto analogo al test precedente, con la differenza che in questo caso sono state considerate le stesse taglie dei componenti d'impianto ottenute nel test n°4.

Tabella 5.45. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°6

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	1
Numero moduli fotovoltaici	16565
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	579
Volume serbatoio [m ³]	19995
Capacità batterie [kWh]	19049
Potenza nominale generatore diesel [kW]	177

Tabella 5.46. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°6

Costo acqua [€/m³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.83	0.23	2.46	70,542,582	36.39	94.72	94.92	32

Anche in questo caso i risultati degli indici tecnico-economici sono diversi da quelli del test n°4 a causa della diversa curva di domanda d'acqua.

Osservando il grafico relativo al serbatoio (figura 5.8) si nota che nel mese di gennaio il serbatoio si svuota completamente e rimane ad un livello quasi nullo per alcune ore, perciò non si riesce ad avere una copertura totale della domanda idrica. Infatti il tasso di copertura della domanda idrica è inferiore al 95%.

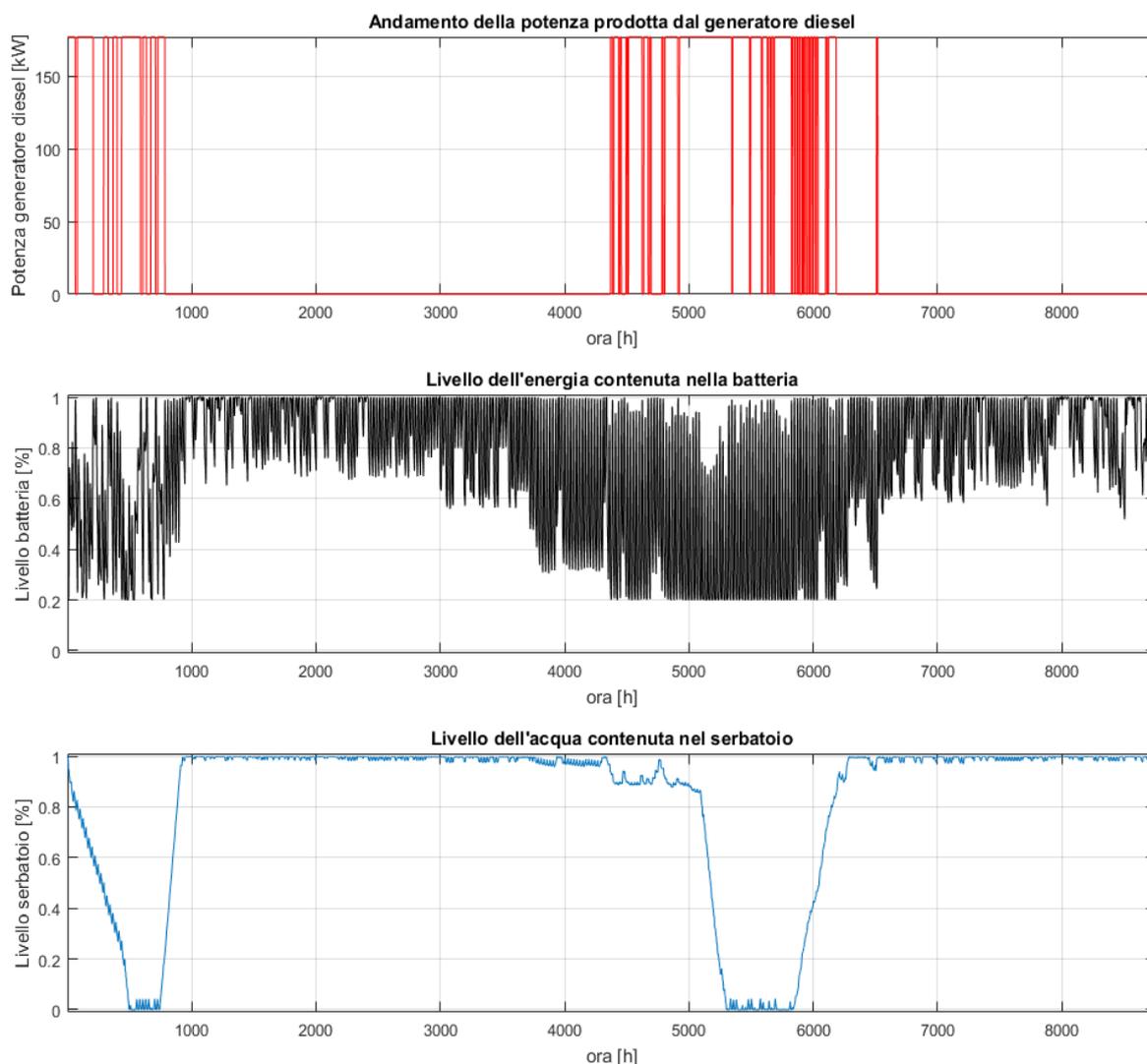


Figura 5.56. Grafici relativi al test n°6

5.3.7 Test n°7

Nelle simulazioni precedenti era stato imposto che la batteria iniziasse a fornire energia all'impianto di dissalazione solamente quando il livello dell'acqua contenuta nel serbatoio scendeva al di sotto del 90% del volume totale. In questo test, invece, è stato deciso di non fissare il valore del livello del serbatoio al di sotto del quale la batteria inizia a fornire energia all'impianto di dissalazione, ma di includerlo come variabile di ottimizzazione.

I limiti delle sette variabili di ottimizzazione sono riportati in tabella 5.20.

Tabella 5.47. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°7

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	20000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	0	3175
Livello serbatoio	0.2	0.9

Risultati

Tabella 5.48. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°7

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	1
Numero moduli fotovoltaici	16483
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	628
Volume serbatoio [m ³]	19974
Capacità batterie [kWh]	19185
Potenza nominale generatore diesel [kW]	180
Livello serbatoio-batteria	0.8

Tabella 5.49. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°7

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.96	0.24	2.65	65,467,688	33.99	96	95	35

Il valore ottimale del livello del serbatoio al di sotto del quale la batteria entra in funzione è pari all'80% del volume totale del serbatoio, inferiore di dieci punti percentuali rispetto al valore fissato nelle altre simulazioni. Il serbatoio presenta il medesimo volume di quello ottenuto nel test n°4. Anche la capacità delle batterie di accumulo, la potenza nominale del generatore diesel, il numero di turbine eoliche ed il numero di moduli fotovoltaici sono pressoché gli stessi. La potenza nominale dell'impianto di dissalazione è invece maggiore di circa 50 kW, forse perché, avendo diminuito il livello del serbatoio al di sotto del quale la batteria fornisce energia all'impianto di dissalazione, è necessario che quest'ultimo abbia una maggiore potenza nominale per soddisfare i requisiti imposti di soddisfazione della domanda idrica.

Il costo dell'acqua dissalata è leggermente maggiore di quello ottenuto nel test n°4 (maggiore di 0.03 €/m³), mentre il costo dell'energia prodotta è il medesimo. Il tasso di soddisfazione della domanda idrica è maggiore di un punto percentuale, mentre gli altri indici tecnico-economici sono uguali.

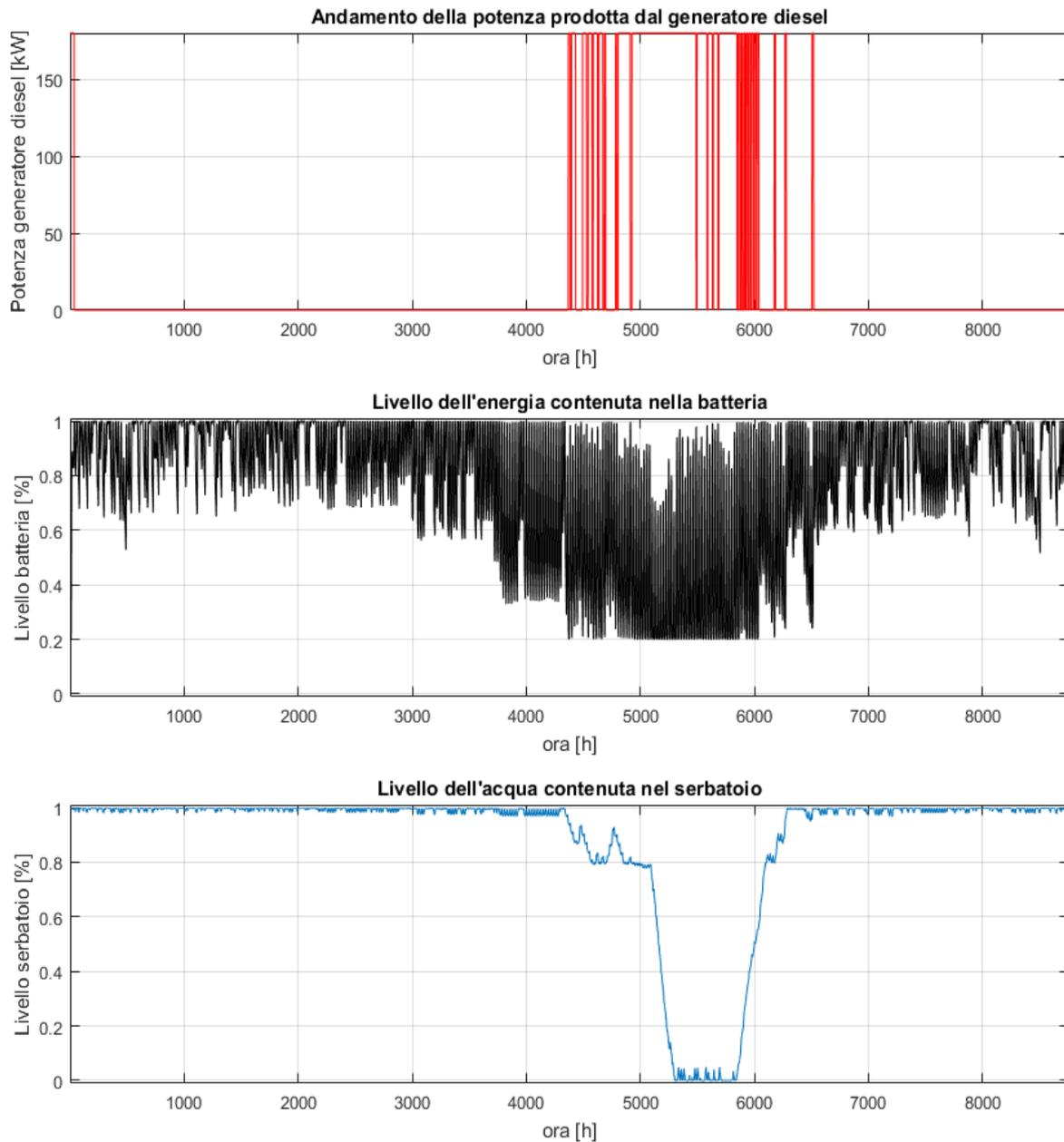


Figura 5.57. Grafici relativi al test n°7

In figura 5.9 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello dell'energia all'interno delle batterie e del livello dell'acqua nel serbatoio.

Osservando il grafico del livello dell'acqua nel serbatoio si può notare che nell'intervallo 4000-5000 h il livello del serbatoio cala fino all'80% del volume totale e cerca di

mantenersi a tale livello grazie all'energia fornita dalle batterie. Il livello poi scende fino ad annullarsi a causa dell'elevata domanda idrica. Questa è l'unica differenza rispetto al test n°4 come del resto ci si aspettava.

5.3.8 Test n°8

In tutti in test precedenti (ad eccezione dei test n°5 e n°6) il serbatoio si svuota completamente solamente in estate quando la domanda idrica è molto elevata, mentre durante gli altri mesi il serbatoio è quasi del tutto pieno e presenta delle oscillazioni di livello molto ridotte. Dunque, il fatto che il serbatoio si ricarichi completamente già molti mesi prima del picco della domanda e che nei mesi invernali venga prelevata una piccola quantità d'acqua, fa pensare che il tasso di ricambio dell'acqua non sia molto elevato. Perciò si è pensato si far svuotare il serbatoio quasi del tutto anche in inverno, quando la domanda idrica è più bassa, in modo tale da assicurare un certo ricambio d'acqua all'interno del serbatoio, ma allo stesso tempo di garantire comunque una certa riserva d'acqua all'inizio dell'estate per far fronte all'elevata domanda. Al fine di ottenere questo è stato deciso che l'impianto di dissalazione debba fermarsi per un periodo di tre settimane (corrispondenti a 504 ore) durante il periodo invernale. Durante questo periodo il serbatoio continuerà a svuotarsi il modo tale da utilizzare l'acqua che è stata dissalata nei mesi precedenti. Al termine delle tre settimane l'impianto di dissalazione tornerà a funzionare e il serbatoio verrà riempito nuovamente.

Tabella 5.50. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°8

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	20000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	0	3175

Risultati

Tabella 5.51. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°8

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	1
Numero moduli fotovoltaici	16720
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	577
Volume serbatoio [m ³]	19956
Capacità batterie [kWh]	19237
Potenza nominale generatore diesel [kW]	166

Tabella 5.52. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°8

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.93	0.24	2.64	65,525,208	34.2	95.39	95	35

In questa simulazione la potenza nominale dell'impianto fotovoltaico è pari a 5350 kW, mentre quella dell'impianto eolico è di 800 kW, per un totale di 6150 kW di potenza installata degli impianti a fonte rinnovabile. Il sovradimensionamento degli impianti a fonte rinnovabile è pari a circa il 64%.

La potenza nominale del generatore diesel è invece leggermente inferiore rispetto al valore ottenuto nel test n°4 (circa 10 kW).

Il volume del serbatoio e la capacità delle batterie sono invece entrambe molto vicine ai corrispondenti limiti superiori.

I valori degli indici tecnico-economici sono pressoché uguali a quelli ottenuti nel test n°4. Il fatto che con questa simulazione i risultati siano molto simili a quelli del test n°4 significa che anche imponendo all'impianto di dissalazione di fermarsi per tre settimane, la configurazione adottata rimane comunque ottimale.

In figura 5.10 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello dell'energia all'interno delle batterie e del livello dell'acqua nel serbatoio.

Avendo imposto all'impianto di dissalazione di fermarsi per tre settimane in inverno si nota che il livello dell'acqua nel serbatoio in questo periodo scende poco oltre il 20% del volume totale e poi risale quando l'impianto riprende a funzionare regolarmente. Si può vedere che il serbatoio impiega meno tempo a caricarsi rispetto a scaricarsi. Nella fase di riempimento sia la batteria sia il generatore diesel forniscono energia all'impianto di dissalazione.

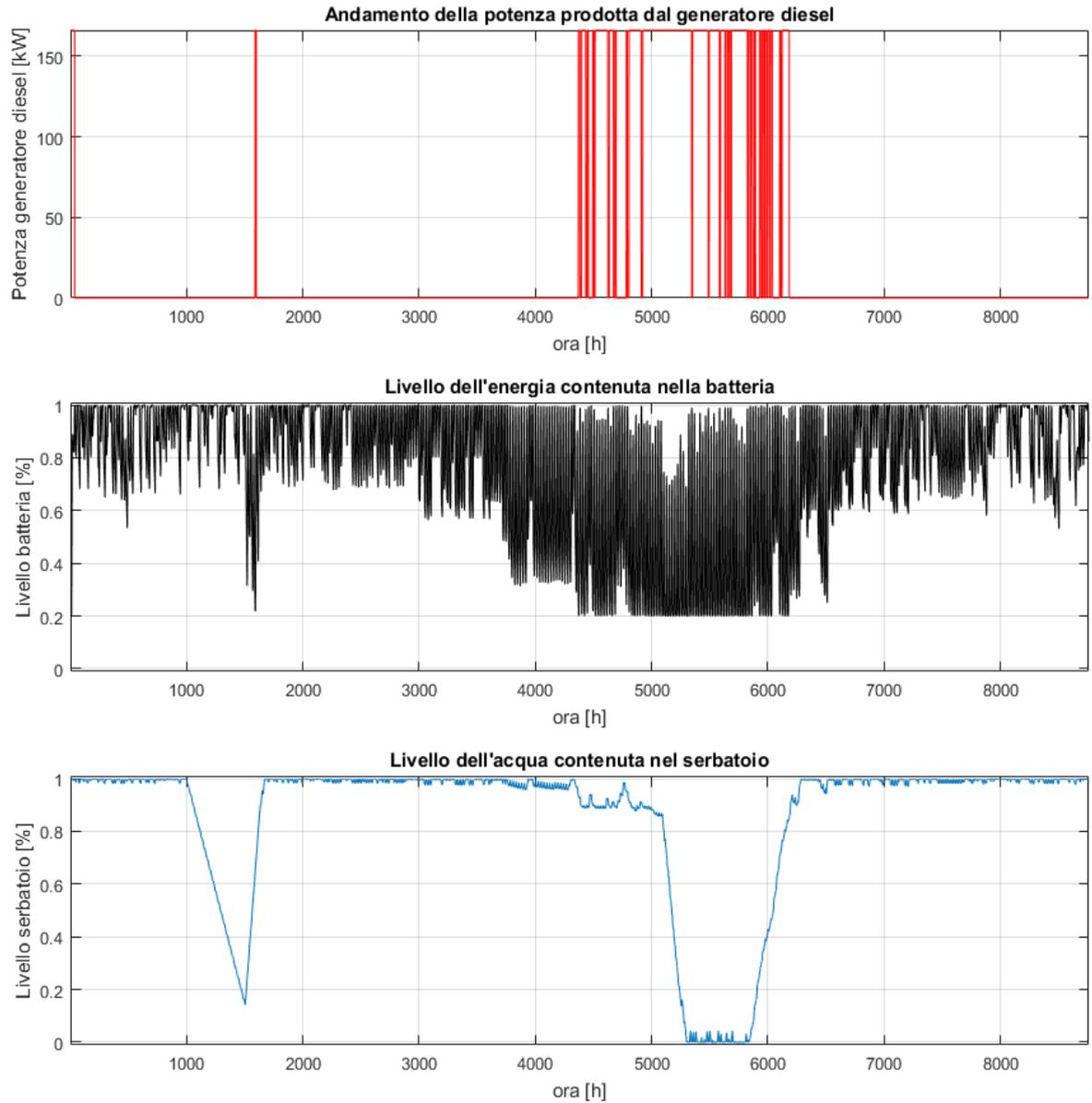


Figura 5.58. Grafici relativi al test n°8

5.3.9 Test n°9

Poiché sia nel test n°4 sia nel test n°8 il valore che si ottiene della potenza nominale del generatore diesel è piuttosto basso, mentre il valore di capacità delle batterie è elevato, si è deciso di diminuire il limite superiore della capacità delle batterie. Come nel test precedente viene imposto all'impianto di dissalazione di rimanere fermo per tre settimane in inverno.

I vincoli delle variabili di ottimizzazione sono riportati in tabella 5.26.

Tabella 5.53. Limite inferiore e limite superiore delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°9

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	14000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	0	3175

Risultati

Tabella 5.54. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi al test n°9

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	2
Numero moduli fotovoltaici	10365
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	647
Volume serbatoio [m ³]	19244
Capacità batterie [kWh]	13719
Potenza nominale generatore diesel [kW]	484

Tabella 5.55. Risultati degli indici tecnico-economici relativi al test n°9

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
2.07	0.27	2.24	62,737,609	37.43	96.87	95	35

Diminuendo il limite superiore della capacità delle batterie è aumentata la potenza nominale del generatore diesel, probabilmente perché, essendo minore la capacità delle batterie, esse si scaricano più velocemente e perciò è necessario che il generatore diesel abbia una potenza maggiore per soddisfare i vincoli sul tasso di copertura della domanda idrica e del carico elettrico.

Il numero di turbine eoliche è pari a due e quindi la potenza installata dell'impianto eolico è pari a 1600 kW. Il numero dei moduli fotovoltaici è diminuito rispetto al test precedente e la potenza dell'impianto fotovoltaico risulta essere pari a circa 3320 kW. Il sovradimensionamento degli impianti a fonte rinnovabile è pari al 28%, più basso rispetto al test precedente. La potenza nominale dell'impianto di dissalazione è pressoché pari al suo limite superiore e quindi è aumentata rispetto al test precedente di circa 12%.

Il costo dell'acqua dissalata e il costo dell'energia prodotta sono pari a quelli che sono stati ottenuti nel test n°2. Anche i valori degli altri indici tecnico-economici sono simili a quelli ottenuti nel test n°2.

Il VAN che si ottiene in questo test è minore di circa il 4% rispetto a quello ottenuto nel test n°8. Inoltre sia il costo dell'acqua dissalata sia il costo dell'energia prodotta sono maggiori: il primo è maggiore di circa 0.14 €/m³ rispetto al valore del test n°8, mentre il secondo è superiore di 0.03 €/kWh. Tuttavia il tasso di soddisfazione della domanda idrica risulta essere maggiore di circa 1.5 punti percentuali rispetto al test n°8. Dunque l'aumento della capacità delle batterie e la diminuzione della potenza installata degli impianti a fonte rinnovabile hanno come effetto l'aumento del costo di dissalazione dell'acqua e del costo di produzione dell'energia elettrica.

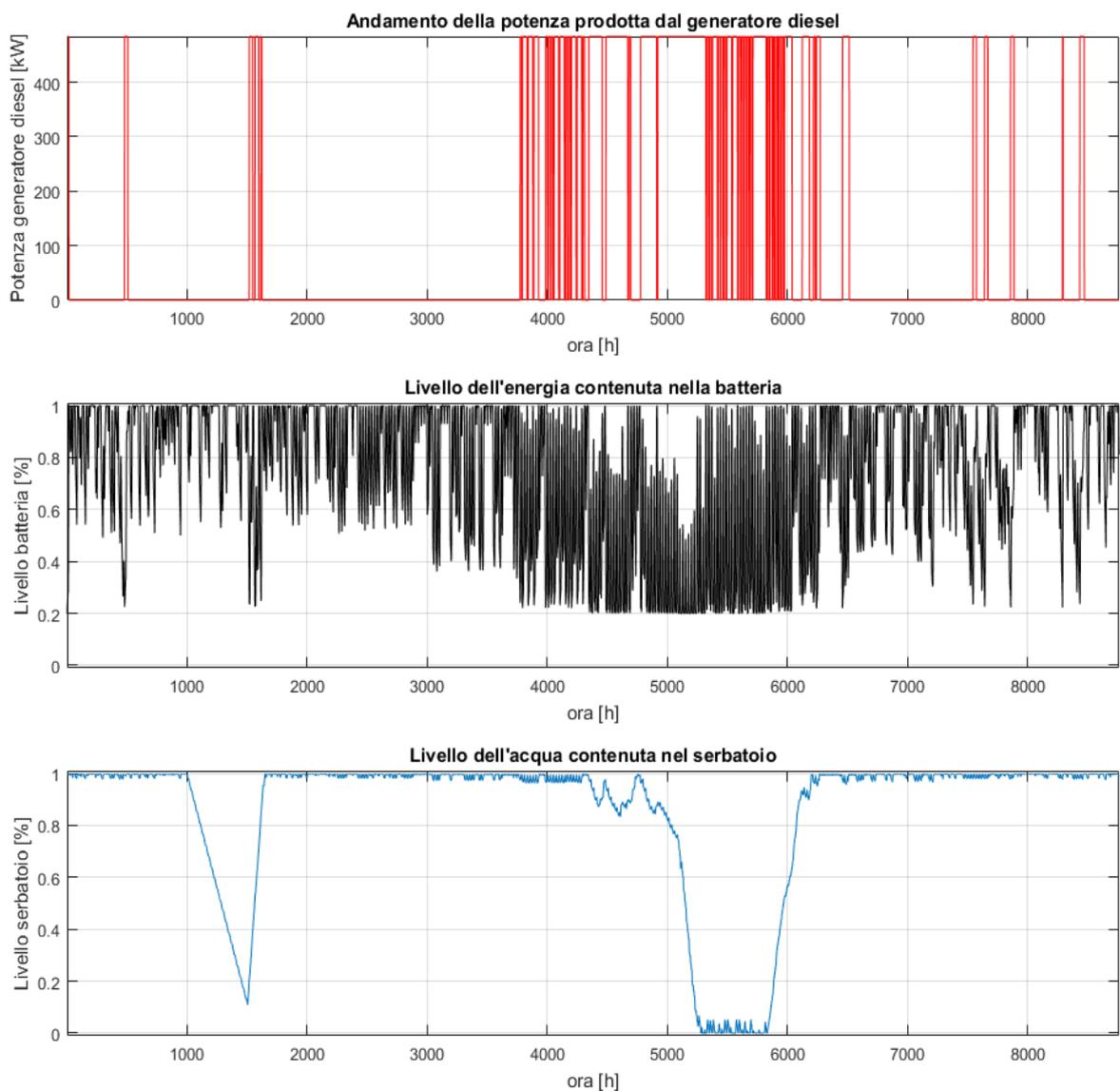


Figura 5.59. Grafici relativi al test n°9

In figura 5.11 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello dell'energia all'interno delle batterie e del livello dell'acqua nel serbatoio.

Si può osservare che, essendo diminuita la capacità delle batterie, il generatore diesel entra in funzione più frequentemente per fornire energia al carico elettrico e all'impianto di dissalazione.

Il grafico relativo al livello dell'acqua nel serbatoio è del tutto analogo a quello del test precedente.

5.4 Confronto tecnico-economico delle soluzioni

I risultati delle simulazioni descritte nel paragrafo precedente devono essere valutati per individuare la soluzione più vantaggiosa. Il confronto tra le varie soluzioni ottenute viene effettuato sulla base degli indici tecnico-economici, valutando in maniera critica i risultati.

In questo confronto vengono escluse le soluzioni relative ai test n°5 e n°6, in quanto non rappresentano delle ottimizzazioni dell'impianto. Infatti in queste simulazioni è stata modificata la curva della domanda idrica, in modo tale da osservare il comportamento del serbatoio di accumulo dell'acqua quando viene forzato a scaricarsi nel periodo invernale.

Tabella 5.56 Tabella riassuntiva dei risultati dei test eseguiti

Test	Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]	Costo medio acqua [€/m ³]
Caso base	2.08	0.27	2.22	62,549,443	37.67	96.82	95	34.36	2.17
Test n°1	2.07	0.27	2.24	62,745,396	37.41	97	95	35	2.16
Test n°2	2.06	0.27	2.23	63,959,208	37.68	100	96	34	2.06
Test n°3	2.09	0.28	2.36	62,629,596	35.67	96.7	96	29	2.19
Test n°4	1.93	0.24	2.62	65,466,855	34.32	95	95	35	2.08
Test n°7	1.96	0.24	2.65	65,467,688	33.99	96	95	35	2.08
Test n°8	1.93	0.24	2.64	65,525,208	34.2	95.39	95	35	2.07
Test n°9	2.07	0.27	2.24	62,737,609	37.43	96.87	95	35	2.16

In tabella 5.29 vengono riassunti i risultati degli indici tecnico-economici delle soluzioni ottenute.

Si può notare che il valore più basso del costo medio dell'acqua è di 2.06 €/m³, il quale viene ottenuto nel test n°2, in cui il volume del serbatoio di stoccaggio è pari a circa 60000 m³. Sebbene il costo di dissalazione dell'acqua ottenuto in questo test non sia il minore, il basso valore del costo medio dell'acqua è dovuto al fatto che il tasso di copertura della domanda idrica è pari al 100%, che si ottiene grazie all'elevato volume del serbatoio.

Tuttavia un serbatoio di 60000 m³ è piuttosto grande, considerando che deve essere installato in un'isola avente circa 5000 abitanti. Inoltre esso viene scaricato totalmente solamente una volta all'anno, mentre per la maggior parte del tempo rimane quasi completamente pieno. Dunque la grande quantità d'acqua stoccata al suo interno viene utilizzata in un periodo di tempo limitato, mentre durante la restante parte dell'anno sarebbe sufficiente un volume di stoccaggio molto più piccolo. Nonostante questa sia la soluzione ottimale dal punto di vista della copertura della domanda idrica, non sembra però esserlo dal punto di vista pratico, perché si ottengono comunque buoni risultati anche con un volume del serbatoio pari a 20000 m³, come negli altri test.

I valori più elevati del VAN sono quelli corrispondenti ai test n°4, 7, 8. In questi test la capacità totale del sistema di batterie è pari a circa 19000 kWh, mentre la potenza nominale del generatore diesel è compresa tra 160 kW e 180 kW. A queste soluzioni corrispondono anche i più bassi valori del costo dell'acqua dissalata e del costo dell'energia prodotta. Ciò è dovuto al fatto che la capacità delle batterie è maggiore rispetto agli altri test, in cui è compresa tra 13000 kWh e 16000 kWh, e questo permette di utilizzare un generatore diesel con una potenza nominale inferiore (negli altri test invece il generatore diesel possiede una potenza installata compresa tra 484-512 kW). Il vantaggio principale di queste configurazioni risiede nel fatto che il generatore diesel non solo ha una potenza nominale inferiore, ma anche lavora per un minor numero di ore (come si può vedere dai grafici riportati nel paragrafo precedente) e questo, dato l'elevato costo dell'energia prodotta dal generatore diesel dovuto al costo del combustibile, permette di mantenere bassi i costi di dissalazione dell'acqua e di produzione dell'energia.

La differenza principale della soluzione rappresentata dal test n°7 rispetto alle altre simulazioni è data dal fatto che le batterie iniziano a fornire energia elettrica all'impianto di dissalazione quando il livello del serbatoio è inferiore all'80% del volume totale, mentre nei test n°4 e n°8 tale valore è fissato pari a 90%. Però nel test n°7 il costo di dissalazione dell'acqua è maggiore di 0.03 €/m³ rispetto agli altri due test, mentre il costo di produzione dell'energia è il medesimo in tutti e tre i casi. Inoltre nel test n°7 la potenza dell'impianto di dissalazione è pari a 630 kW, superiore di 50 kW rispetto alla potenza dell'impianto di osmosi inversa negli altri due test.

I test n°8 e n°9 rispetto agli altri presentano un periodo in cui l'impianto di dissalazione viene fermato per tre settimane nel mese di febbraio. Questo fermo impianto permette di scaricare parzialmente il serbatoio di stoccaggio dell'acqua dissalata, evitando che esso rimanga totalmente pieno per tutto il periodo invernale. Essendo il serbatoio un sistema aperto, c'è un flusso continuo d'acqua in ingresso e in uscita, perciò considerando un volume pari a 20000 m³ il tempo di permanenza dell'acqua nel serbatoio è di circa un mese, se si ipotizza che l'acqua che viene prelevata dal serbatoio è sempre la prima ad

essere stata immessa. Inoltre durante questo periodo di tempo piuttosto lungo è possibile effettuare tutte le operazioni di manutenzione all'impianto di dissalazione, come la pulizia delle membrane oppure la sostituzione di alcune di esse se necessaria.

Si preferisce adottare questa strategia di controllo del serbatoio di stoccaggio in quanto assicura che ci sia un maggiore ricambio d'acqua nel serbatoio.

Come già riportato nel paragrafo 5.3.9, il test n°9 differisce dal test n°7 perché presenta una minore potenza installata degli impianti a fonte rinnovabile, una potenza nominale maggiore dell'impianto di dissalazione e del generatore diesel ed una capacità delle batterie inferiore. I valori delle variabili di ottimizzazione di questo test conducono ad un VAN più basso rispetto al test n°8, mentre i costi dell'acqua e dell'energia sono maggiori. Anche il costo medio dell'acqua è maggiore di 0.09 €/m³ rispetto al test n°8.

Pertanto è da preferire la soluzione dell'impianto rappresentata dal test n°8, in quanto presenta un VAN più elevato, minori costi dissalazione dell'acqua e di produzione dell'energia ed un minor costo medio dell'acqua. Con questa configurazione si ottengono buoni risultati anche in termini di soddisfazione del carico idrico e del carico elettrico, perciò questa soluzione rappresenta un buon compromesso in termini tecnico-economici.

5.5 Confronto con la configurazione d'impianto di sola dissalazione

In questo paragrafo viene effettuato un confronto tra la soluzione ottimale della configurazione d'impianto in cui viene dissalata l'acqua di mare e prodotta energia elettrica e la configurazione ottimale d'impianto in cui viene solamente dissalata l'acqua di mare, riportata nel capitolo IV.

In tabella 5.30 vengono riportate le taglie delle due diverse configurazioni d'impianto. Per semplicità la configurazione d'impianto di sola desalinizzazione verrà denominata "configurazione I", mentre con il termine di "configurazione II" ci si riferirà all'impianto di desalinizzazione e produzione di energia elettrica.

Tabella 5.57. Confronto tra le configurazioni ottimali del capitolo IV e del capitolo V (taglie dei componenti)

Parametro di progetto	Configurazione I	Configurazione II
Potenza imp. Eolico [kW]	800	800
Potenza imp. Fotovoltaico [kW]	758	5350
Potenza imp. desalinizzazione [kW]	636	580
Volume del serbatoio [m ³]	19400	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	19300
Potenza nominale generatore diesel [kW]	-	170

La configurazione II presenta una potenza nominale dell'impianto fotovoltaico molto più elevata, in quanto è stato aggiunto il carico elettrico. Nella configurazione I la potenza

complessiva degli impianti a fonte rinnovabile è circa 2.5 volte maggiore rispetto alla potenza nominale dell'impianto di dissalazione, mentre nella configurazione II essa è pari a 1.6 volte la somma del carico elettrico di picco e della potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa. Questo indica che il sovradimensionamento degli impianti a fonte rinnovabile è inferiore nella configurazione in cui sono stati aggiunti il carico elettrico e il generatore diesel. Tuttavia è da considerare anche che la capacità delle batterie della configurazione II è circa 4 volte maggiore rispetto alla configurazione I: è questa differenza di capacità di accumulo, unitamente all'aggiunta del generatore diesel, a permettere la riduzione del sovradimensionamento degli impianti eolico e fotovoltaico. È da ricordare che nei capitoli precedenti era stato osservato che nel caso di impianto di sola desalinizzazione l'aumento della capacità delle batterie determinava un incremento sostanziale del costo di dissalazione dell'acqua, perciò risultava più conveniente un sovradimensionamento maggiore degli impianti a fonte rinnovabile. Aggiungendo il carico elettrico, invece, è possibile aumentare la capacità delle batterie senza che il costo di dissalazione cresca notevolmente.

Il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua dissalata nelle due configurazioni è pressoché uguale, mentre l'impianto di dissalazione della configurazione II presenta una minor potenza nominale.

In tabella 5.31 vengono riportati i risultati tecnici ed economici delle due configurazioni d'impianto.

Nella configurazione II il tasso di soddisfazione della domanda idrica è maggiore di 1.47 punti percentuali. Nonostante in questa configurazione il costo di dissalazione dell'acqua sia maggiore di 0.05 €/m³, il maggiore tasso di copertura della domanda idrica rende il costo medio dell'acqua uguale in entrambi i casi.

La percentuale di energia rigettata nella configurazione II è inferiore circa 20 punti percentuali, in quanto il sovradimensionamento degli impianti a fonte rinnovabile è minore rispetto alla configurazione I, mentre la capacità delle batterie è maggiore. L'aggiunta del carico elettrico permette quindi di utilizzare in maniera migliore l'energia elettrica prodotta.

Il tasso di contribuzione della batteria all'impianto di dissalazione nei due casi è rispettivamente pari a 6.9% e 7.9%. Nella configurazione II in cui è presente anche il carico elettrico viene calcolato il tasso di contribuzione della batteria al carico elettrico, che è pari a 43.8%, il quale è un valore abbastanza più elevato rispetto al precedente e pertanto indica che le batterie in questa configurazione vengono utilizzate con più frequenza. Ciò era stato notato anche osservando i grafici relativi al livello di energia nelle batterie. Nella configurazione I si era notato che le batterie venivano utilizzate d'estate quando la domanda idrica è elevata, mentre durante la restante parte dell'anno rimanevano completamente cariche. Invece nella configurazione II le batterie si

scaricavano e si ricaricavano durante tutto l'anno, perché venivano utilizzate per coprire il carico elettrico, che a differenza della domanda idrica non è differibile, ma deve essere soddisfatto istantaneamente e perciò richiede l'utilizzo dell'energia contenuta nelle batterie quando la produzione di energia è inferiore alla richiesta. Pertanto le batterie vengono utilizzate in maniera migliore nella configurazione II. Inoltre il fatto che si scarichino anche in inverno e non solo d'estate permette di accumulare l'eccesso di energia prodotta durante tutto l'anno, riducendo così la percentuale di energia rigettata.

Tabella 5.58. Confronto tra le configurazioni ottimali del capitolo IV e del capitolo V (indici tecnico-economici)

Parametro	Configurazione I	Configurazione II
Tasso di copertura della domanda idrica [%]	94	95.47
Tasso di copertura del carico elettrico [%]	-	95
Percentuale di energia rigettata [%]	53.9	35
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia per il dissalatore [%]	6.9	7.9
Tasso di contribuzione della batteria alla fornitura di energia del carico elettrico [%]	-	43.8
Fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico [%]	13.6	13.8
Fattore di capacità dell'impianto eolico [%]	14.8	28.9
Fattore di capacità del generatore diesel [%]	-	16.2
N° di ore di funzionamento del generatore diesel	-	1421
N° di accensioni del generatore diesel	-	27
Quantità di acqua prodotta [m ³ /anno]	535,356	537,988
Costo d'investimento [€]	7,980,663	20,056,048
Costi operativi e di manutenzione [€/anno]	363,259	725,884
Costo annuale dell'impianto [€/anno]	1,003,648	2,335,233
Costo di produzione dell'acqua [€/m ³]	1.88	1.93
Costo medio dell'acqua [€/m ³]	2.07	2.07
Costo di produzione dell'energia [€/kWh]	-	0.24
VAN [€]	21,712,217	65,476,366
TIR [%]	29.69	34.12

Il fattore di capacità dell'impianto fotovoltaico è simile in entrambe le configurazioni, mentre il fattore di capacità relativo all'impianto eolico è maggiore nella configurazione II, probabilmente perché, essendo l'energia prodotta da tale impianto uguale in entrambi i casi (perché la potenza nominale è la medesima), ma essendo diminuita la percentuale di energia rigettata, la percentuale di energia prodotta dall'impianto eolico che viene effettivamente utilizzata è maggiore.

Il fattore di capacità del generatore diesel è pari al 16%, valore adeguato considerando che esso funge da generatore ausiliario e che il suo utilizzo è prevalentemente concentrato nei mesi estivi, quando sia la richiesta idrica sia la domanda elettrica sono massime.

Il costo d'investimento della configurazione II è decisamente più elevato di quello della configurazione I, circa 2.5 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 il doppio di quello della configurazione I. In figura 5.12 viene rappresentato un grafico che pone a confronto i costi d'investimento per ciascun componente delle due configurazioni d'impianto. Nella configurazione II l'impianto fotovoltaico e il sistema di batterie compongono la parte più consistente del costo d'investimento totale, mentre nella configurazione I il componente con il costo d'investimento maggiore è l'impianto di osmosi inversa.

Come già detto precedentemente con la configurazione II si ottiene un costo di dissalazione dell'acqua maggiore, ma, dato il maggiore tasso di copertura della domanda, il costo medio è il medesimo. Nonostante i costi della configurazione II siano più elevati, il valore attuale netto della configurazione II è il triplo del valore ottenuto con la configurazione I, mentre il TIR è superiore di 4.5 punti percentuali. Naturalmente è da sottolineare che le due configurazioni servono utenze diverse, perché nella configurazione I manca l'utenza elettrica.

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.

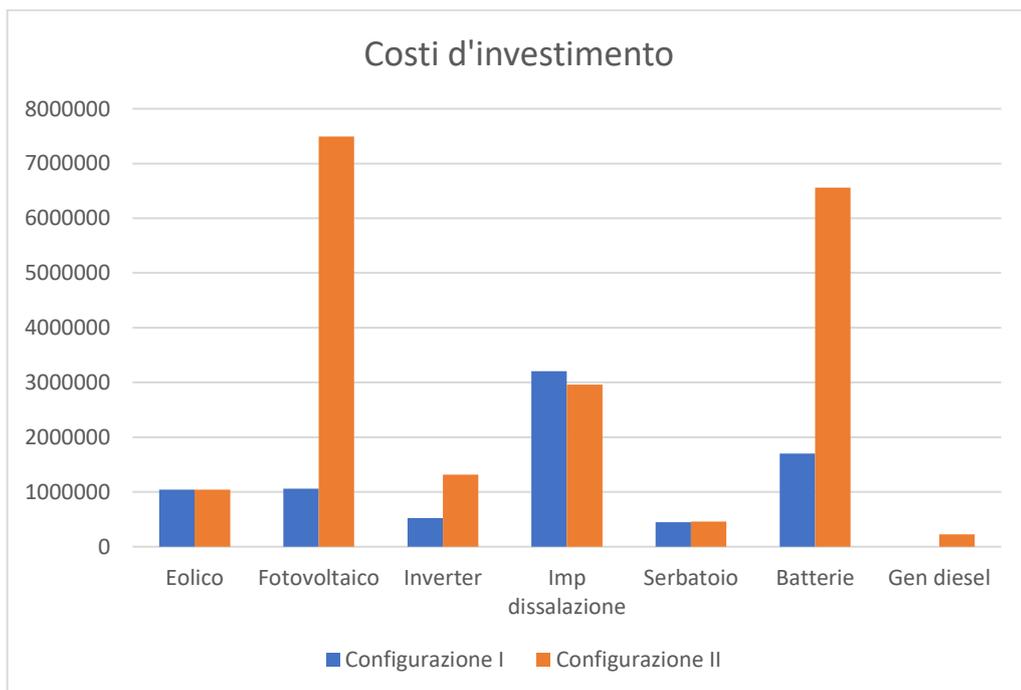


Figura 5.60. Ripartizione per componente del costo d'investimento delle due configurazioni d'impianto

Capitolo VI

Prove sul modello d'impianto

In questo capitolo vengono riportati i risultati di alcune prove effettuate per testare il modello dell'impianto realizzato. Vengono eseguiti sia dei test variando alcuni parametri prestazionali dell'algoritmo di ottimizzazione, sia dei test relativi ad altri casi di studio. Lo scopo è quello di verificare l'accuratezza della procedura di ottimizzazione al variare di alcuni parametri e di verificare se l'utilizzo di questo modello può essere esteso anche ad altri casi di studio.

6.1 Modifica della tolleranza di ottimizzazione

Il primo test che viene eseguito consiste nella variazione della tolleranza della fitness function e della funzione di vincolo relative all'ottimizzazione dell'impianto. Nel capitolo V tutte le simulazioni sono state effettuate considerando una tolleranza pari a 10^{-5} , pertanto in questa fase vengono eseguite delle simulazioni variando la tolleranza da 10^{-1} a 10^{-5} . Inoltre viene calcolato il tempo impiegato dall'algoritmo per giungere a convergenza. I risultati ottenuti vengono confrontati con quelli relativi all'ottimizzazione effettuata considerando una tolleranza di 10^{-5} , la quale viene presa come riferimento, e vengono perciò calcolati gli scostamenti percentuali. Poiché all'aumentare della tolleranza il tempo impiegato dall'algoritmo di ottimizzazione per giungere a convergenza è maggiore, con queste simulazioni è possibile individuare il valore di tolleranza minimo per ottenere risultati sufficientemente accuranti nel minor tempo possibile.

Gli altri parametri prestazionali sono stati mantenuti uguali a quelli riportati nel capitolo V, ovvero:

- Popolazione pari a 200;
- Generazioni pari a 200;
- Élite count pari a $0.08 \cdot \text{pop}$.

I limiti delle variabili di ottimizzazione sono quelli relativi alla configurazione ottimale riportata nel capitolo V e vengono riassunti in tabella 6.1.

Tabella 6.59. Limiti inferiore e superiore delle variabili di ottimizzazione

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	650
Volume serbatoio [m ³]	8500	20000
Capacità batterie [kWh]	5000	20000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	0	3175

I risultati delle simulazioni effettuate considerando valori di tolleranza diversi sono riportati in tabella 6.2.

Tabella 6.60. Risultati delle ottimizzazioni

Parametro	Simulazione 1	Simulazione 2	Simulazione 3	Simulazione 4	Simulazione 5
Tolleranza	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
Tempo	10h 22min	10h 23min	12h 30min	16h 54min	25h 44min
N_wt	1	1	1	1	1
N_pv	16626	16713	16610	16694	16724
P_di [kW]	630	585	583	577	577
V_tank [m ³]	19557	19415	19548	19930	19997
E_batt [kWh]	19351	19553	19087	19244	19249
P_diesel_nom [kW]	172	169	177	168	166
VAN [€]	65,455,073	65,407,522	65,413,498	65,496,617	65,524,325
Costo acqua [€/m ³]	1.96	1.93	1.93	1.93	1.93
Costo energia [€/kWh]	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24

Considerando come caso di riferimento la simulazione con tolleranza pari a 10⁻⁵, vengono calcolati gli scostamenti percentuali dei risultati ottenuti nelle altre prove di ottimizzazione, i quali sono riportati in tabella 6.3.

Tabella 6.61. Scostamenti percentuali dei risultati delle simulazioni rispetto al caso di riferimento

Parametro	Scostamento percentuale [%]			
	Simulazione 1	Simulazione 2	Simulazione 3	Simulazione 4
N_wt	0	0	0	0
N_pv	0.59	0.07	0.68	0.18
P_di	-9.19	-1.39	-1.04	0
V_tank	2.20	2.91	2.25	0.34
E_batt	-0.53	-1.58	0.84	0.03
P_diesel_nom	-3.61	-1.81	-6.63	-1.20
VAN	0.11	0.18	0.17	0.04
Costo acqua	-1.55	0	0	0
Costo energia	0	0	0	0

Come si può osservare dalla tabella 6.3 all'aumentare della tolleranza aumenta l'accuratezza complessiva dei risultati dell'ottimizzazione. È da tenere in considerazione che all'aumentare della tolleranza lo scostamento percentuale di ogni singolo parametro non sempre diminuisce, come si può ad esempio osservare per il numero di moduli fotovoltaici. Tuttavia se si considerano contemporaneamente tutti i parametri, la simulazione con tolleranza pari a 10^{-4} è quella che presenta globalmente gli scostamenti inferiori.

In figura 6.1 vengono riportati i valori degli scostamenti percentuali di tutti i parametri ottenuti nelle varie simulazioni rispetto ai corrispondenti della simulazione con tolleranza pari a 10^{-5} . In questo modo si può osservare anche graficamente come migliora l'accuratezza complessiva dei risultati all'aumentare della tolleranza considerata.

Dai risultati ottenuti si può concludere che la simulazione n°4 (con tolleranza pari a 10^{-4}) è quella che più si avvicina come risultati al caso di riferimento, essendo gli scostamenti percentuali relativamente bassi. Con tale valore di tolleranza il tempo impiegato dall'algoritmo per giungere a convergenza è di 16h e 54min, circa 8h e 49min in meno rispetto alla simulazione n°5. Pertanto la tolleranza di 10^{-4} rappresenta il valore minimo di tolleranza che permette di ottenere risultati accettabili nel minor tempo possibile.

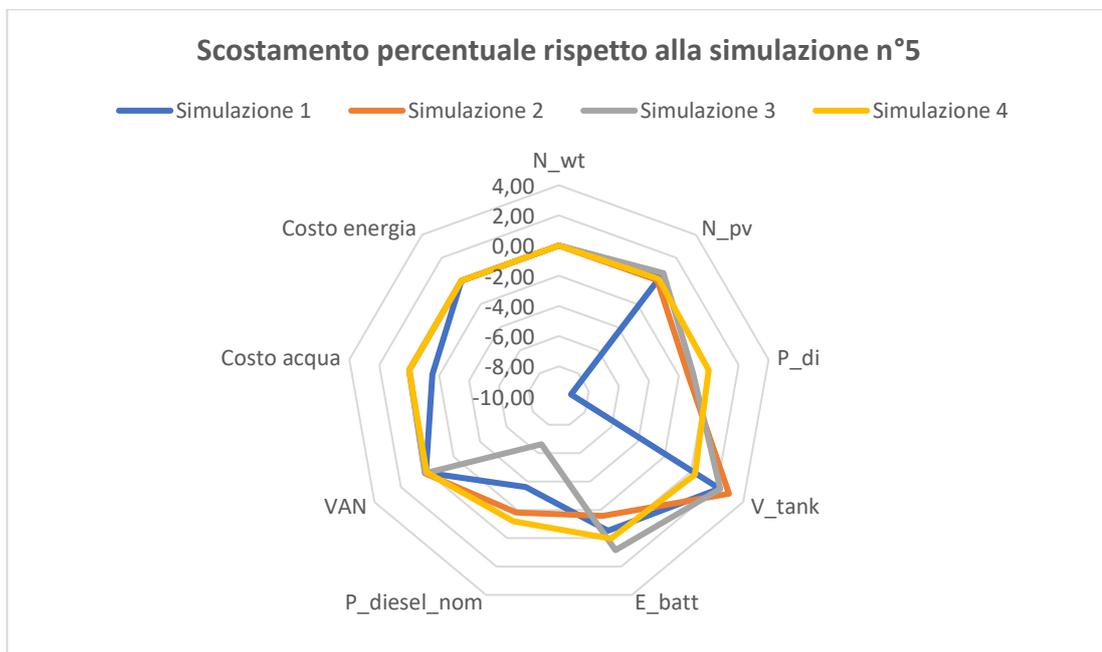


Figura 6.61. Scostamento percentuale dei risultati delle ottimizzazioni

Nelle figure 6.2 e 6.3 vengono riportati agli andamenti rispetto al tempo dei valori assoluti degli scostamenti percentuali delle variabili di ottimizzazione e degli indici economici.

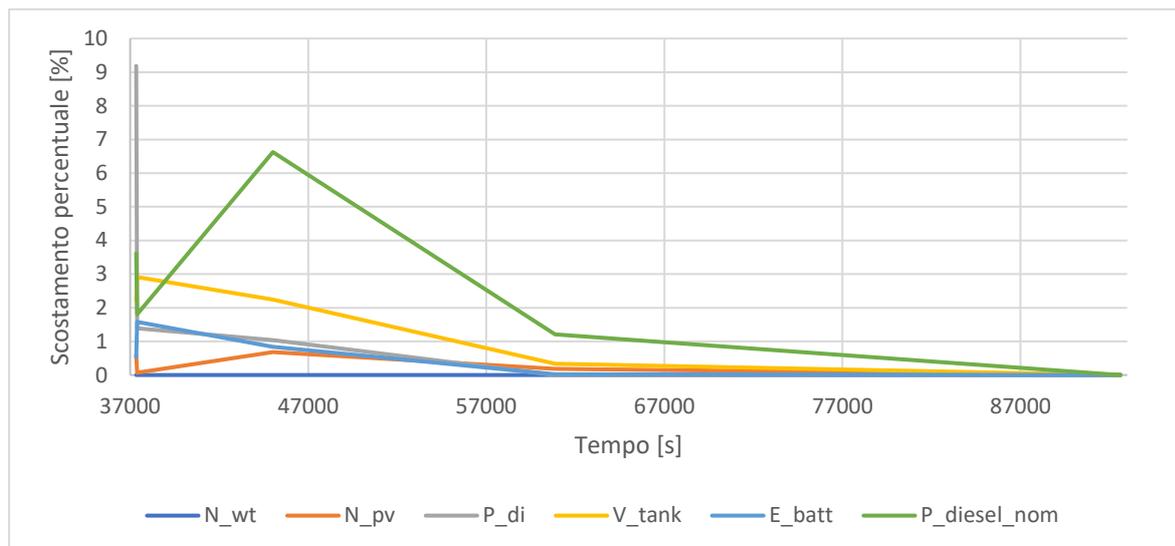


Figura 6.62. Andamento rispetto al tempo degli scostamenti percentuali delle variabili di ottimizzazione

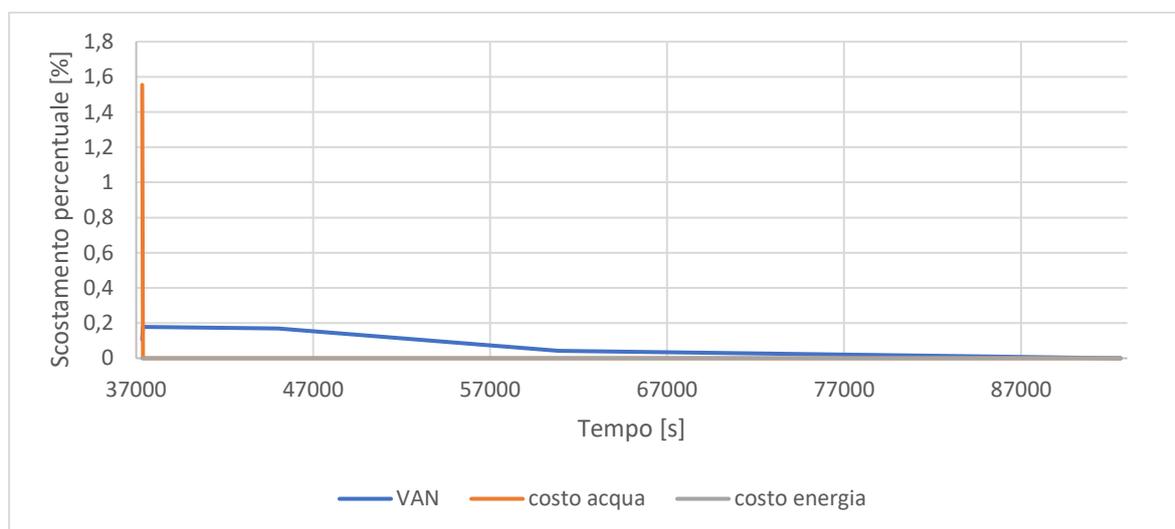


Figura 6.63. Andamento rispetto al tempo degli scostamenti percentuali degli indici economici

Si può vedere che le variabili di ottimizzazione presentano scostamenti maggiori rispetto agli indici economici. Infatti il costo dell'energia è sempre uguale in tutte le simulazioni effettuate, il costo di dissalazione dell'acqua raggiunge il valore ottimo dalla seconda simulazione, mentre il VAN si avvicina sempre di più al valore ottimale all'aumentare della tolleranza.

6.2 Modifica della popolazione e delle generazioni

In questo paragrafo vengono eseguite delle ottimizzazioni variando i valori della popolazione e del numero di generazioni e mantenendo la tolleranza pari a 10^{-5} . Contemporaneamente viene registrato il tempo impiegato dall'algoritmo di

ottimizzazione per terminare e i risultati ottenuti vengono confrontati con quelli della simulazione presa come riferimento. Lo scopo è quello di determinare i valori minimi di popolazione e del numero di generazioni che permettono di ottenere risultati sufficientemente accurati nel minor tempo possibile.

Il caso preso come riferimento per il confronto dei risultati è la simulazione in cui pop=200 e gen=200, riportata nel capitolo V.

I valori di popolazione e numero di generazioni che sono stati considerati sono:

- pop=50, gen=50;
- pop=100, gen=100;
- pop=150, gen=150;
- pop=200, gen=200.

I limiti delle variabili di ottimizzazione sono quelli riportati in tabella 6.1.

Nella tabella 6.4 vengono riportati i risultati ottenuti nelle diverse simulazioni. È da precisare che solamente nella simulazione con pop=200 e gen=200 l'algoritmo termina per il raggiungimento della convergenza, mentre negli altri casi esso termina per il raggiungimento del numero massimo di generazioni.

Tabella 6.62. Risultati delle ottimizzazioni

Parametro	Simulazione 1	Simulazione 2	Simulazione 3	Simulazione 4
Popolazione	50	100	150	200
Generazioni	50	100	150	200
Tempo	2h 54min	10h 27min	23h 35min	25h 44min
N_wt	1	1	1	1
N_pv	10605	16672	16706	16724
P_di [kW]	611	579	578	577
V_tank [m ³]	18079	19589	19873	19997
E_batt [kWh]	15087	19207	19248	19249
P_diesel_nom [kW]	440	171	167	166
VAN [€]	62,977,932	65,463,917	65,503,920	65,524,325
Costo acqua [€/m ³]	2.04	1.93	1.93	1.93
Costo energia [€/kWh]	0.27	0.24	0.24	0.24

All'aumentare della popolazione e del numero di generazioni aumenta il tempo richiesto dall'algoritmo per terminare, come si attendeva. Per confrontare i risultati vengono calcolati gli scostamenti percentuali rispetto alla simulazione n°4, avente pop=200 e gen=200, la quale è l'unica che termina perché l'algoritmo giunge a convergenza.

Tabella 6.63. Scostamenti percentuali dei risultati delle simulazioni rispetto al caso di riferimento

Parametro	Scostamento percentuale [%]		
	Simulazione 1	Simulazione 2	Simulazione 3
N_wt	0	0	0
N_pv	36.59	0.31	0.11
P_di	-5.89	-0.35	-0.17
V_tank	9.59	2.04	0.62
E_batt	21.62	0.22	0.01
P_diesel_nom	-165.06	-3.01	-0.60
VAN	3.89	0.09	0.03
Costo acqua	-5.70	0	0
Costo energia	-12.50	0	0

Come si può osservare dalla tabella 6.5 all'aumentare della popolazione e del numero di generazioni aumenta l'accuratezza di tutti i risultati. Nella prima simulazione avente pop=50 e gen=50, lo scostamento dei risultati è molto elevato, mentre il tempo impiegato è molto basso, di sole 2h e 54min. Alla seconda simulazione, con pop=100 e gen=100, gli scostamenti si abbassano notevolmente, con conseguente aumento del tempo richiesto che è pari a 10h e 27min. Gli scostamenti percentuali dei risultati della simulazione n°3, con pop=150 e gen=150, sono minimi ed il tempo richiesto è di 23h e 35min, inferiore di sole 2h e 8min rispetto alla simulazione n°4, presa come riferimento. Tuttavia nella simulazione n°3 l'algoritmo termina ancora per il raggiungimento del numero massimo di generazioni, indice del fatto che esso deve essere aumentato. Pertanto è preferibile utilizzare pop=200 e gen=200, anche perché il tempo aggiuntivo richiesto è molto basso. In figura 6.4 viene rappresentato il grafico in cui vengono riportati i valori degli scostamenti percentuali dei risultati delle simulazioni rispetto al caso di riferimento.

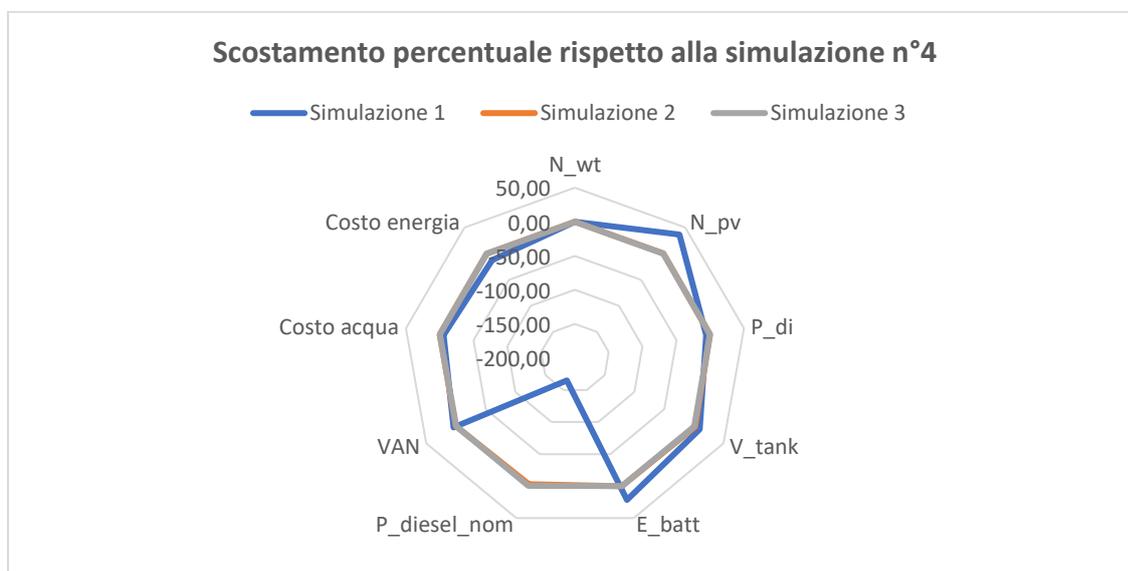


Figura 6.64. Scostamento percentuale dei risultati delle ottimizzazioni

Nelle figure 6.5 e 6.6 vengono riportati gli andamenti rispetto al tempo dei valori assoluti degli scostamenti percentuali delle variabili di ottimizzazione e degli indici economici. Il fatto che si ottengano risultati già abbastanza accurati dalla seconda simulazione è riscontrabile anche da questi grafici.

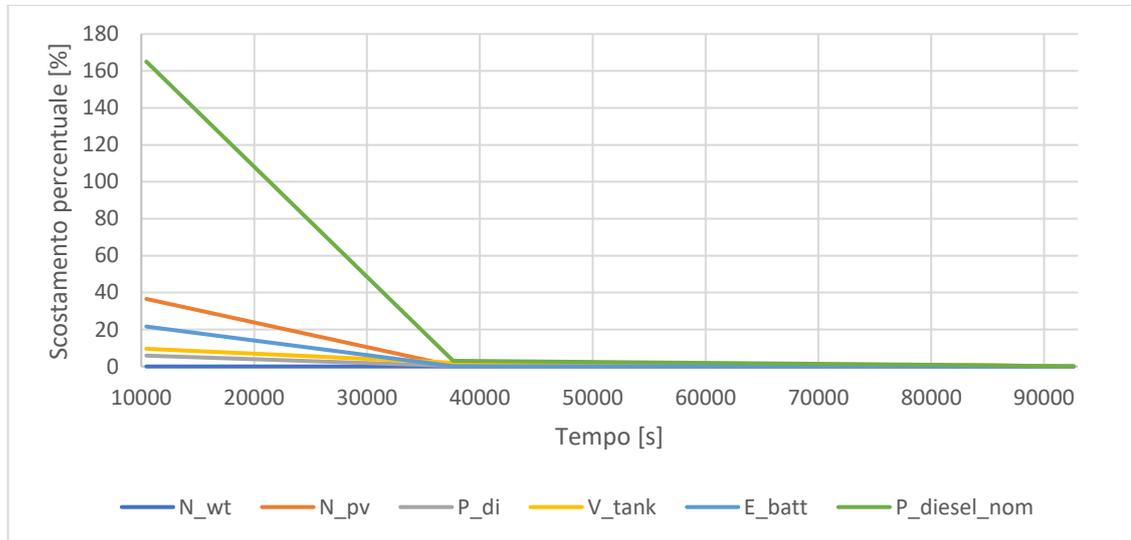


Figura 6.65. Andamento rispetto al tempo degli scostamenti percentuali delle variabili di ottimizzazione

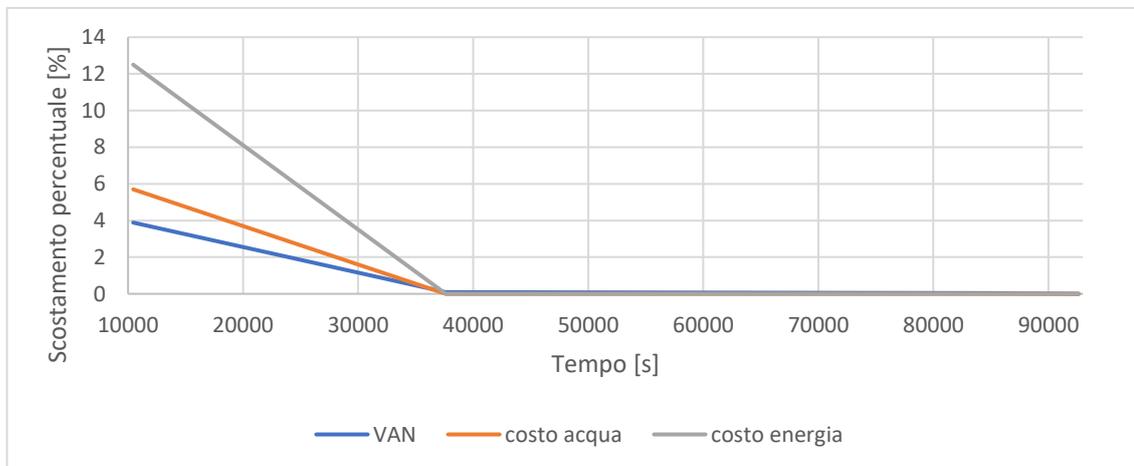


Figura 6.66. Andamento rispetto al tempo degli scostamenti percentuali degli indici economici

6.3 Modifica delle curve del carico elettrico e della richiesta di acqua

Poiché nel caso esaminato sia la curva di carico elettrico sia quella relativa alla richiesta di acqua presentano un picco nel mese di agosto a causa dell'aumento di persone presenti sull'isola dovuto al turismo, si è deciso di effettuare l'ottimizzazione dell'impianto nel caso in cui ogni mese dell'anno presenti le stesse richieste di energia elettrica e di acqua del mese di agosto. In questo modo le curve del carico elettrico e della domanda di acqua risultano essere più uniformi durante l'anno.

Lo scopo di questa prova è di verificare che il modello dell'impianto realizzato con Matlab-Simulink abbia validità non solo per il caso di studio esaminato nella tesi, ma anche per altri casi di studio.

I parametri prestazionali dell'algoritmo di ottimizzazione considerati sono:

- pop=200;
- gen=200;
- tol=10⁻⁵;
- Élite count=0.08·pop.

6.3.1 Prima ottimizzazione

In questa prima ottimizzazione sono stati considerati i limiti inferiore e superiore delle variabili di ottimizzazione riportati in tabella 6.6. Rispetto al caso di studio esaminato nei capitoli precedenti, in questa nuova situazione la richiesta d'acqua è più uniforme durante l'anno, perciò la potenza nominale dell'impianto di dissalazione deve essere aumentata per far fronte alla maggiore richiesta d'acqua. Inoltre, nei capitoli precedenti era stato osservato che il volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua pari a circa 20000 m³ era necessario soprattutto in estate, quando la richiesta d'acqua era maggiore, ma negli altri mesi dell'anno risultava essere sovradimensionato. In questo nuovo caso, però potrebbe essere necessario un volume minore, sia perché la curva della richiesta d'acqua è più uniforme sia perché l'impianto di dissalazione presenterà una potenza nominale superiore e quindi viene migliorata la contemporaneità tra produzione e richiesta. Fatte queste osservazioni sono stati scelti i valori dei limiti superiore ed inferiore riportati in tabella 6.6..

Tabella 6.64. Limiti delle variabili di ottimizzazione

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	5
Numero moduli fotovoltaici	625	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	480	800
Volume serbatoio [m ³]	4000	10000
Capacità batterie [kWh]	5000	20000
Potenza nominale generatore diesel [kW]	0	3175

I risultati dell'ottimizzazione sono riportati nelle tabelle 6.7 e 6.8.

Tabella 6.65. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi alla prima ottimizzazione

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	5
Numero moduli fotovoltaici	19667
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	800
Volume serbatoio [m ³]	9941
Capacità batterie [kWh]	19998
Potenza nominale generatore diesel [kW]	971

Tabella 6.66. Risultati degli indici tecnico-economici relativi alla prima ottimizzazione

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.65	0.22	1.42	174,271,050	58.45	98.8	95.44	28.8

Come si attendeva il valore della potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa è aumentato, mentre il volume del serbatoio è prossimo al limite superiore, indice del fatto che tale valore dovrebbe essere aumentato per verificare l'esistenza di una soluzione migliore che presenti un volume del serbatoio maggiore. È da notare che il numero di turbine eoliche è pari a 5, mentre nel capitolo V tale valore era uguale ad 1, perché in questo caso il fabbisogno annuo di energia elettrica è aumentato, quindi è necessario che gli impianti di produzione dell'energia abbiano una potenza installata superiore. Per lo stesso motivo sono aumentati anche il numero di moduli fotovoltaici e la potenza nominale del generatore diesel.

Infine si nota che il costo dell'acqua è inferiore di 0.28 €/m³ rispetto al costo ottenuto nella configurazione d'impianto ottimale descritta nel capitolo V. Il costo dell'energia, invece, è inferiore di 0.02 €/kWh. Inoltre i tassi di copertura della domanda idrica e della domanda elettrica sono superiori, mentre la percentuale di energia rigettata è minore di circa 6 punti percentuali.

In figura 6.7 vengono riportate le curve della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello delle batterie e del livello dell'acqua contenuta nel serbatoio. Come si può osservare il generatore diesel viene utilizzato con molta frequenza, infatti il suo fattore di capacità è pari al 46%. Invece, per quanto riguarda il serbatoio, si vede che esso si carica e si scarica con una certa frequenza quindi il volume di accumulo viene sfruttato durante l'intero anno.

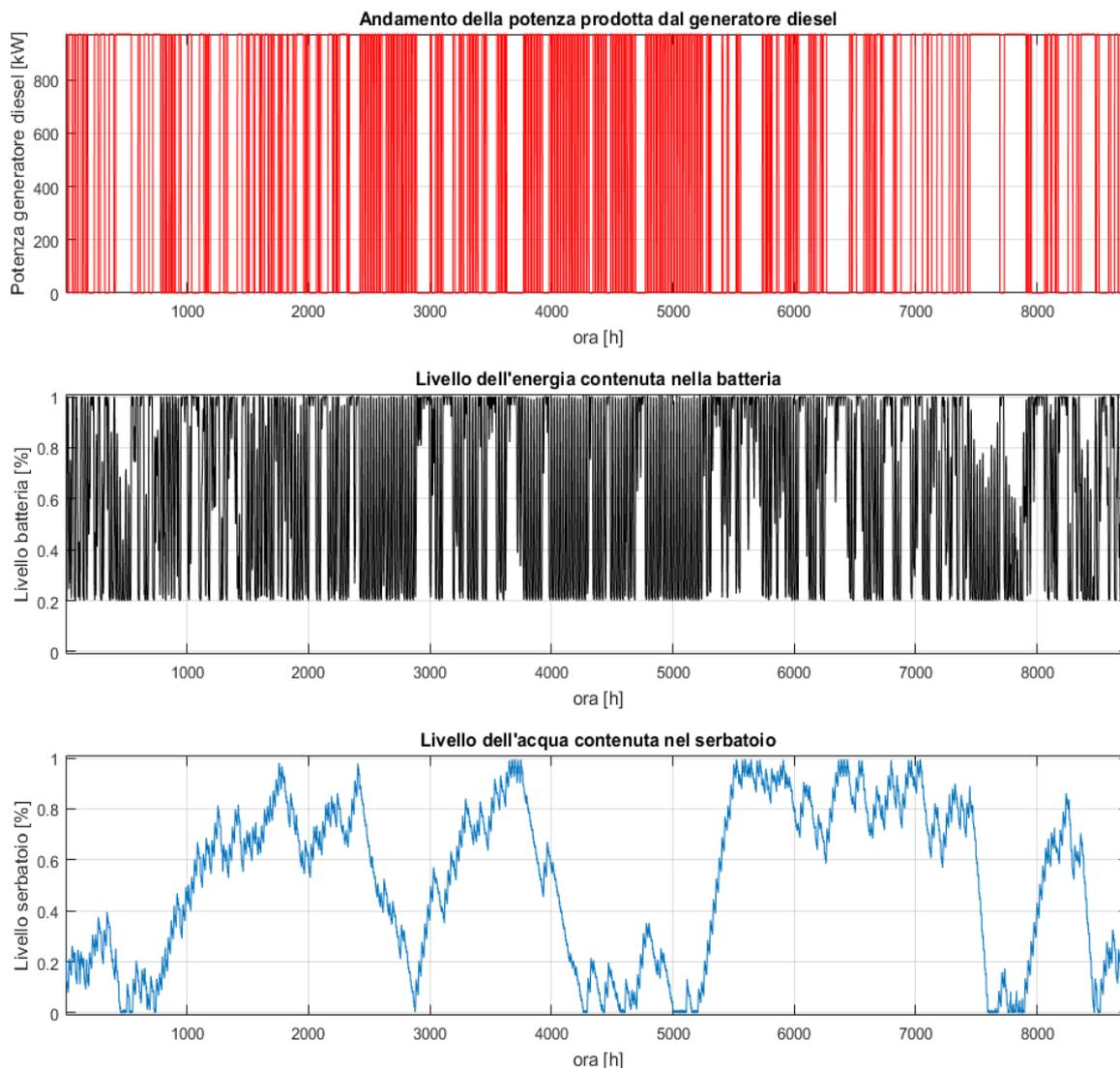


Figura 6.67. Grafici relativi alla prima ottimizzazione

6.3.2 Seconda ottimizzazione

In questa seconda ottimizzazione è stato aumentato il limite superiore del volume del serbatoio fino a 20000 m³, mentre per le altre variabili sono stati considerati gli stessi limiti della prima ottimizzazione. I risultati ottenuti sono riportati nelle tabelle 6.9 e 6.10.

Tabella 6.67. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi alla seconda ottimizzazione

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	5
Numero moduli fotovoltaici	19684
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	800
Volume serbatoio [m ³]	19965
Capacità batterie [kWh]	19981
Potenza nominale generatore diesel [kW]	969

Tabella 6.68. Risultati degli indici tecnico-economici relativi alla seconda ottimizzazione

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.65	0.22	1.43	174,943,639	58.36	99.8	95.4	28.62

Avendo aumentato il limite superiore del volume del serbatoio, il valore ottimale di questa variabile è aumentato. I risultati delle altre variabili di ottimizzazione sono pressoché uguali a quelli della prima ottimizzazione effettuata. Anche i valori degli indici economici sono circa gli stessi. Con l'aumento del volume del serbatoio il tasso di copertura della richiesta d'acqua è aumentato di un punto percentuale, e risulta essere quasi del 100%. Il raddoppiamento del volume del serbatoio di stoccaggio dell'acqua però non determina una variazione sostanziale dei risultati.

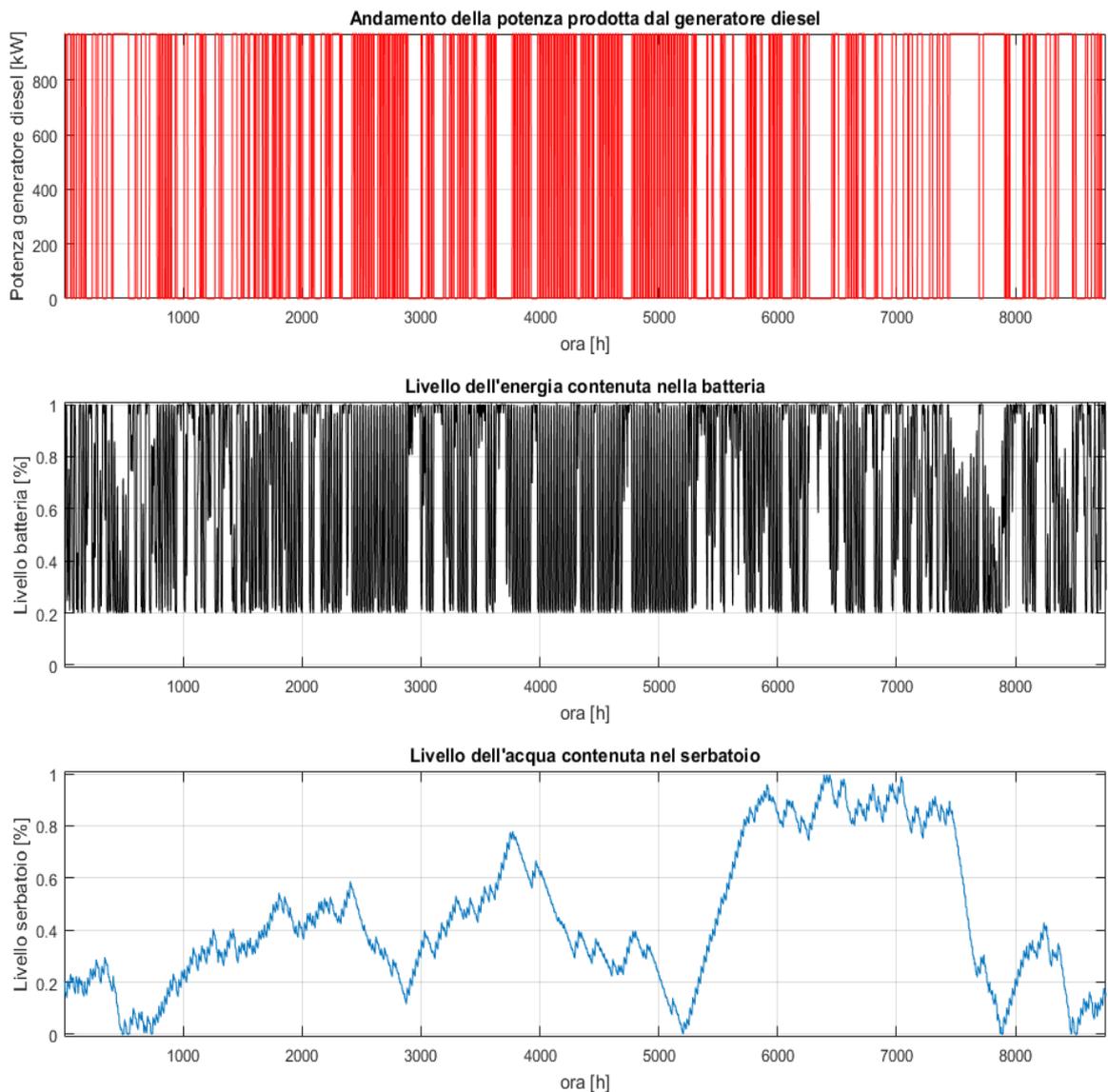


Figura 6.68. Grafici relativi alla seconda ottimizzazione

In figura 6.8 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello delle batterie e del livello dell'acqua contenuta nel serbatoio. In questo caso il serbatoio si riempie completamente solo intorno a 6400h, mentre per la restante parte del tempo viene riempito solo parzialmente. Dunque forse non è necessaria l'installazione di un volume così grande dato che con un volume di 10000 m³ il tasso di copertura è inferiore di un solo punto percentuale.

6.3.3 Terza ottimizzazione

Poiché il valore assunto dalla capacità delle batterie nelle ottimizzazioni precedenti è prossimo al limite superiore, si è deciso di provare ad aumentare tale limite fino a 30000 kWh. I limiti delle altre variabili sono gli stessi della prima ottimizzazione.

I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 6.69. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi alla terza ottimizzazione

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	5
Numero moduli fotovoltaici	20000
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	800
Volume serbatoio [m ³]	9996
Capacità batterie [kWh]	29681
Potenza nominale generatore diesel [kW]	621

Tabella 6.70. Risultati degli indici tecnico-economici relativi alla terza ottimizzazione

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.57	0.20	1.58	178,625,855	54.7	98.71	95.01	23.58

Come si può osservare dai risultati la capacità delle batterie è aumentata e presenta un valore prossimo al limite superiore. L'aumento di questa variabile determina una diminuzione della potenza nominale del generatore diesel e delle ore di funzionamento di quest'ultimo. Il minor utilizzo del generatore diesel determina un minor consumo di combustibile e quindi il prezzo dell'acqua e dell'energia si riducono. Infatti il combustibile consumato in un anno è pari a circa $4.93 \cdot 10^9$ l/anno, mentre nelle configurazioni precedenti tale valore era di circa $7.2 \cdot 10^9$ l/anno. I tassi di copertura della domanda idrica e del fabbisogno elettrico non subiscono variazioni, in quanto l'aumento della capacità delle batterie determina una riduzione della potenza nominale del generatore diesel e questi due andamenti si bilanciano senza alcun miglioramento dal

punto di vista della soddisfazione dei carichi. La percentuale di energia rigettata è però diminuita di circa 5 punti percentuali.

In figura 6.9 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello delle batterie e del livello dell'acqua contenuta nel serbatoio.

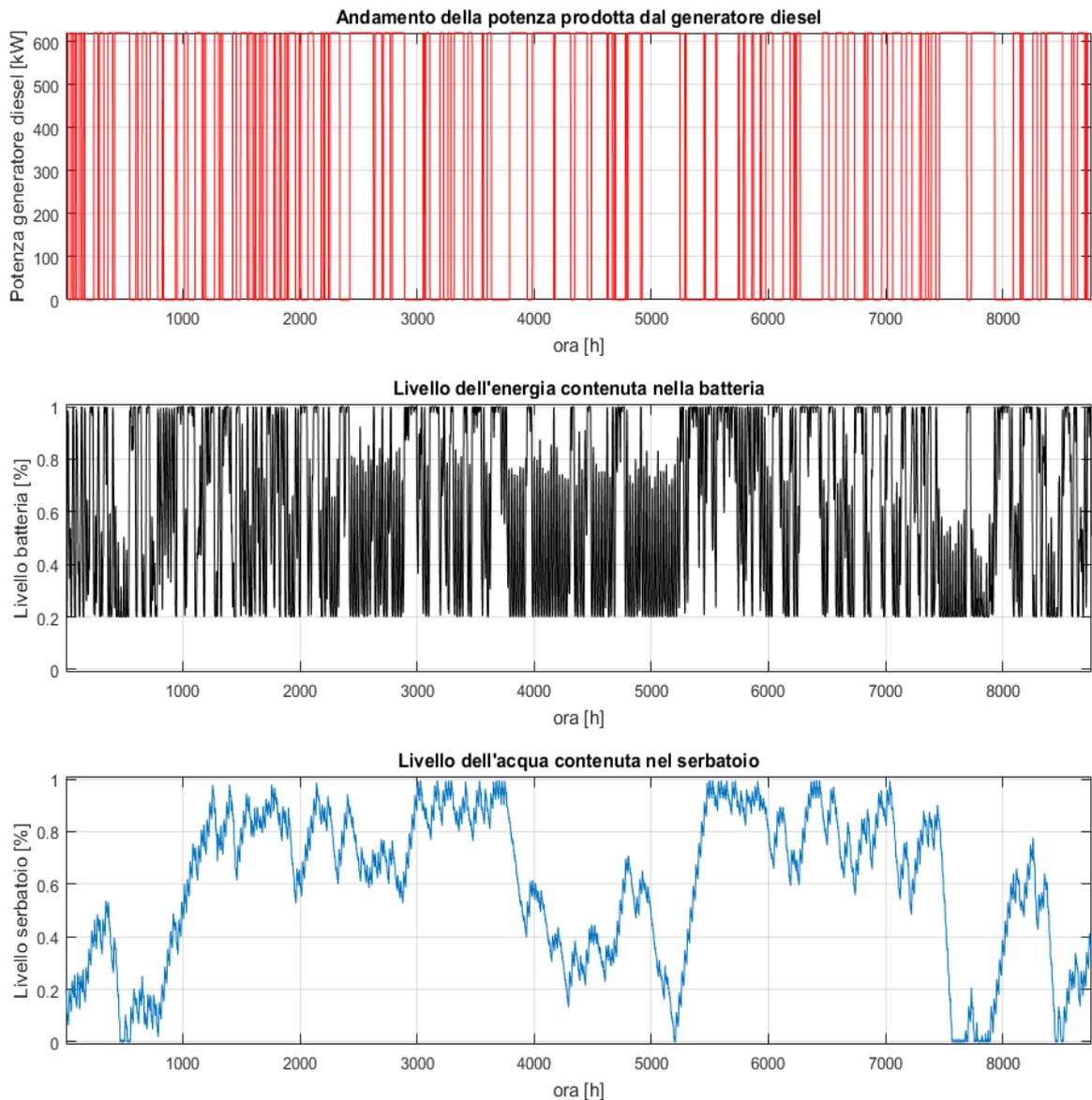


Figura 6.69. Grafici relativi alla terza ottimizzazione

6.3.4 Quarta ottimizzazione

Poiché nelle simulazioni precedenti il numero di moduli fotovoltaici era sempre prossimo al limite superiore si è deciso di aumentare tale limite a 30000. I limiti delle altre variabili sono uguali a quelli della prima ottimizzazione.

I risultati ottenuti vengono riassunti nelle seguenti tabelle.

Tabella 6.71. Risultati delle variabili di ottimizzazione relativi alla quarta ottimizzazione

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	5
Numero moduli fotovoltaici	21210
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	800
Volume serbatoio [m ³]	10000
Capacità batterie [kWh]	19956
Potenza nominale generatore diesel [kW]	958

Tabella 6.72. Risultati degli indici tecnico-economici relativi alla quarta ottimizzazione

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.65	0.22	1.46	174,375,563	57.3	99	95.38	30.67

Il numero di moduli fotovoltaici è aumentato, ma si mantiene molto al di sotto del nuovo limite imposto. I valori delle altre variabili sono abbastanza simili a quelli della prima ottimizzazione.

Sia il costo di dissalazione dell'acqua sia il costo dell'energia sono i medesimi della prima ottimizzazione. I tassi di copertura della domanda idrica e del fabbisogno elettrico non hanno subito variazioni sostanziali rispetto alla prima ottimizzazione, mentre la percentuale di energia rigettata è aumentata di due punti percentuali data la maggiore potenza installata dell'impianto fotovoltaico.

In figura 6.10 vengono riportati i grafici della potenza prodotta dal generatore diesel, del livello delle batterie e del livello dell'acqua contenuta nel serbatoio.

Dovendo scegliere la soluzione ottimale tra quelle proposte, le due soluzioni migliori sono la seconda e la quarta. Esse presentano lo stesso costo di dissalazione dell'acqua e lo stesso costo di produzione dell'energia elettrica. Tuttavia la seconda configurazione presenta un volume del serbatoio che è doppio rispetto alla quarta configurazione, mentre il tasso di copertura della domanda d'acqua è totale, ma superiore di un solo punto percentuale rispetto a quella della quarta configurazione. Il tasso di copertura della domanda elettrica è uguale in entrambi i casi, mentre la percentuale di energia rigettata relativa alla quarta configurazione è superiore di due punti percentuali. Nonostante nella seconda configurazione il volume del serbatoio sia il doppio essa presenta un costo d'investimento totale di $2.79 \cdot 10^7$ €, inferiore a quello della quarta configurazione che è pari a $2.84 \cdot 10^7$ €. Dunque dato il minor costo d'investimento e il maggiore VAN tra le due è preferibile la seconda configurazione.

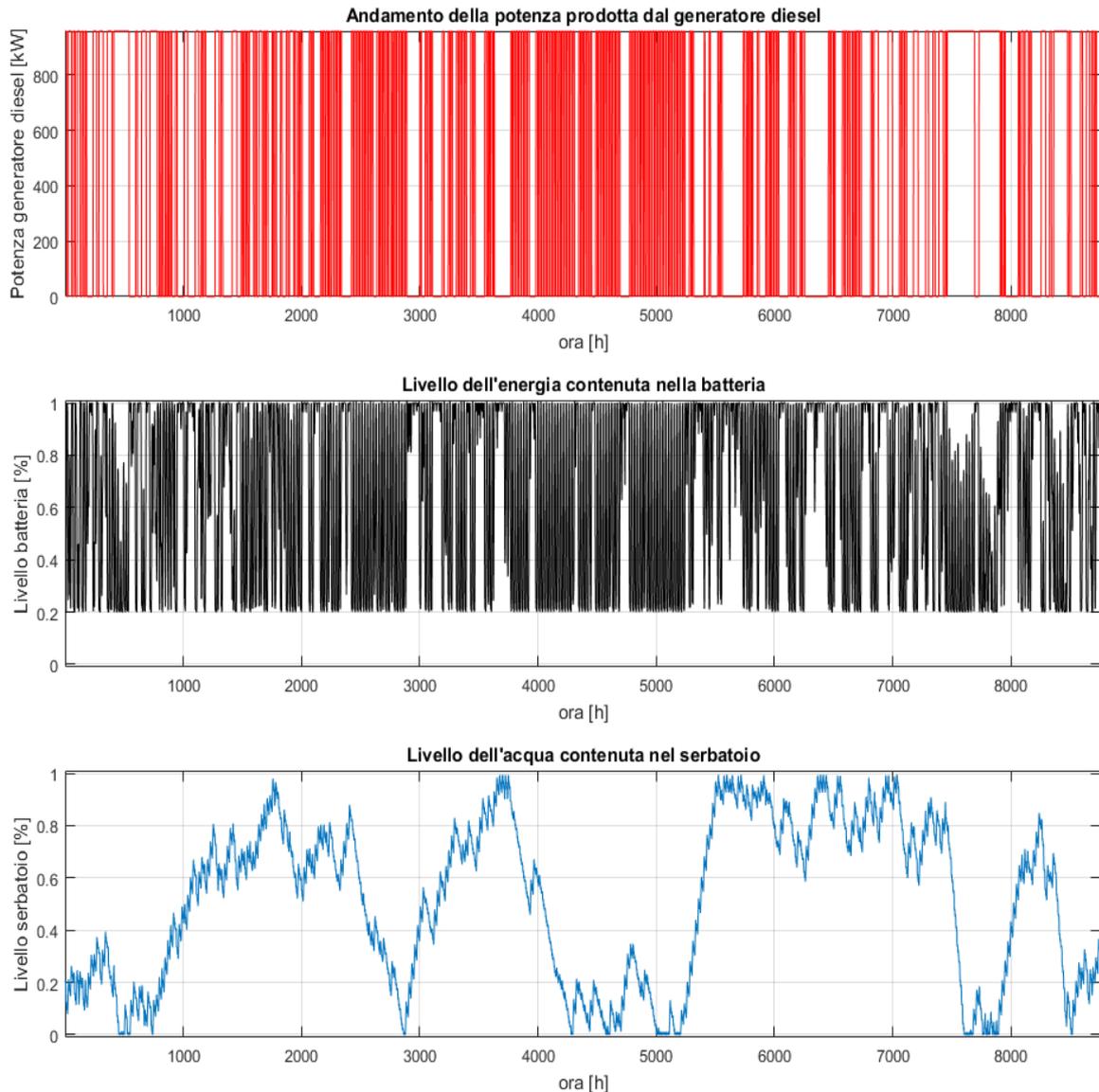


Figura 6.70. Grafici relativi alla quarta ottimizzazione

6.4 Nuovo caso di studio

Per verificare la bontà del modello d'impianto realizzato con Matlab-Simulink è interessante provare ad analizzare un nuovo caso di studio. Se i risultati di questo nuovo caso sono veritieri, allora si può concludere che l'utilizzo del modello realizzato può essere esteso anche ad altri casi.

Del nuovo caso di studio, relativo all'articolo [30], si conoscono le curve orarie del carico elettrico, della richiesta d'acqua e della produzione dell'impianto fotovoltaico relative al giorno tipo invernale ed estivo, le quali vengono riportate di seguito. Per effettuare la simulazione dell'impianto durante un intero anno, è necessario conoscere gli andamenti orari del carico elettrico, della richiesta d'acqua e della potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico per ogni giorno dell'anno. Pertanto si è ipotizzato di replicare l'andamento

delle curve orarie del giorno tipo invernale per tutti i mesi invernali e delle curve orarie del giorno tipo estivo per tutti i mesi estivi.

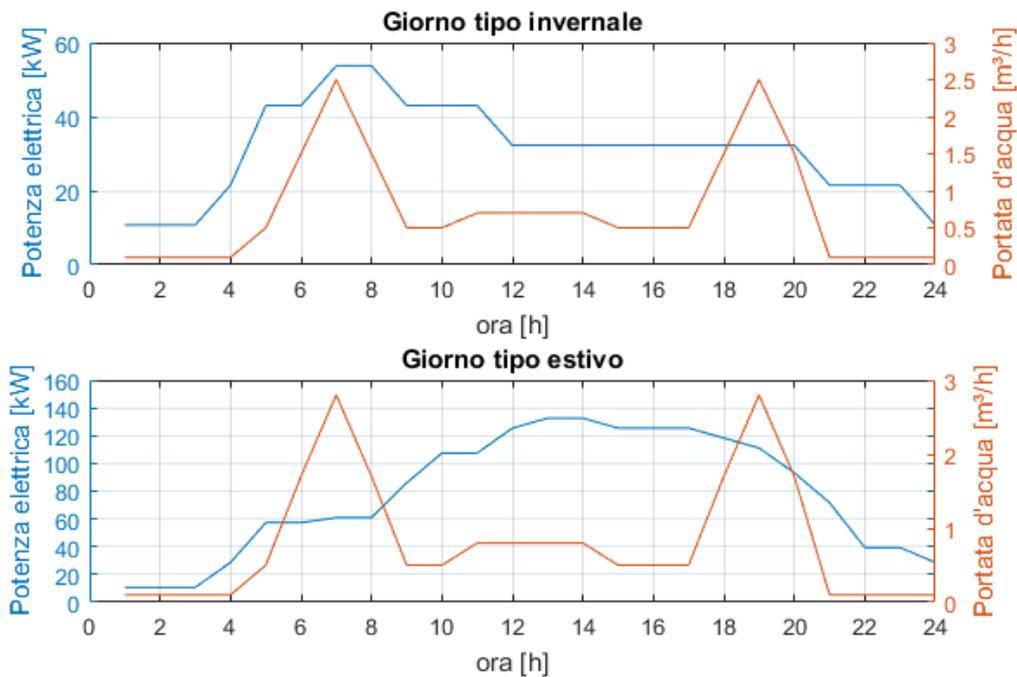


Figura 6.71. Andamenti orari del carico elettrico e della richiesta d'acqua per il giorno tipo invernale (sopra) e per il giorno tipo estivo (sotto)

Poiché non sono noti i valori di velocità del vento e della temperatura dell'acqua da dissalare, sono stati utilizzati gli stessi dati del caso di studio della tesi.

Osservando i dati di potenza elettrica e di portata oraria richiesta, essi sono molto bassi rispetto al caso studiato precedentemente, perciò si dovranno considerare valori molto più bassi delle taglie dei componenti d'impianto. In particolare una turbina eolica con potenza nominale di 800 kW in questo caso è eccessiva, perciò la potenza nominale della singola turbina viene ridotta a 50 kW mentre l'altezza del mozzo viene ridotta a 30 m.

L'impianto di osmosi inversa avrà una potenza nominale non superiore a 8-10 kW. All'interno del modello è stato realizzato un calcolo iterativo per la determinazione della portata prodotta in funzione della potenza disponibile, perciò riducendo notevolmente la potenza installata deve essere modificato il valore di Q_{P_old} , ovvero della portata di permeato che viene utilizzata come punto di partenza nel calcolo iterativo, la quale viene assunta pari a 0.5 m³/h.

I valori di potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico sono relativi ad un impianto di 200 m², di cui non si conosce la potenza nominale, perciò la potenza prodotta viene divisa per l'area totale in modo da ottenere dei dati di potenza specifica, successivamente viene moltiplicata per l'area totale che si desidera installare. Inoltre viene modificato il costo

relativo a tale componente in quanto nel caso precedente il costo d'investimento era espresso in funzione della potenza installata, mentre in questo caso deve essere espresso in funzione della superficie totale:

$$IC_{PV} = 340 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$$

Infine nel dimensionamento dei componenti d'impianto è da tenere in considerazione che la configurazione adottata richiede che la potenza nominale del generatore diesel sia bassa, perché esso è un componente ausiliario.

Fatte queste premesse, il dimensionamento dell'impianto viene eseguito mediante un'ottimizzazione che massimizza il VAN dell'investimento. I limiti superiore ed inferiore delle variabili di ottimizzazione che vengono presi in considerazione sono quelli riportati in tabella 6.15.

Tabella 6.73. Limiti superiore ed inferiore delle variabili di ottimizzazione

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore
Numero turbine eoliche	0	3
Area totale impianto fotovoltaico [m ²]	200	1500
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	1	8
Volume serbatoio [m ³]	40	100
Capacità batterie [kWh]	100	500
Potenza nominale generatore diesel [kW]	5	50

L'ottimizzazione è stata eseguita considerando pop=200, gen=200 e tol=10⁻⁵. I vincoli considerati sono:

- Tasso di copertura della domanda idrica tra 95% e 100%;
- Tasso di copertura del carico elettrico tra 95% e 100%;
- Percentuale di energia rigettata inferiore a 35%.

I risultati sono riportati nelle tabelle 6.16 e 6.17.

Tabella 6.74. Risultati delle variabili di ottimizzazione (caso 1)

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	1
Area totale impianto fotovoltaico [m ²]	1319
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	4
Volume serbatoio [m ³]	40
Capacità batterie [kWh]	500
Potenza nominale generatore diesel [kW]	11

Tabella 6.75. Risultati degli indici tecnico-economici (caso 1)

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
1.88	0.19	3.27	1,807,204	26.02	100	95.04	22.07

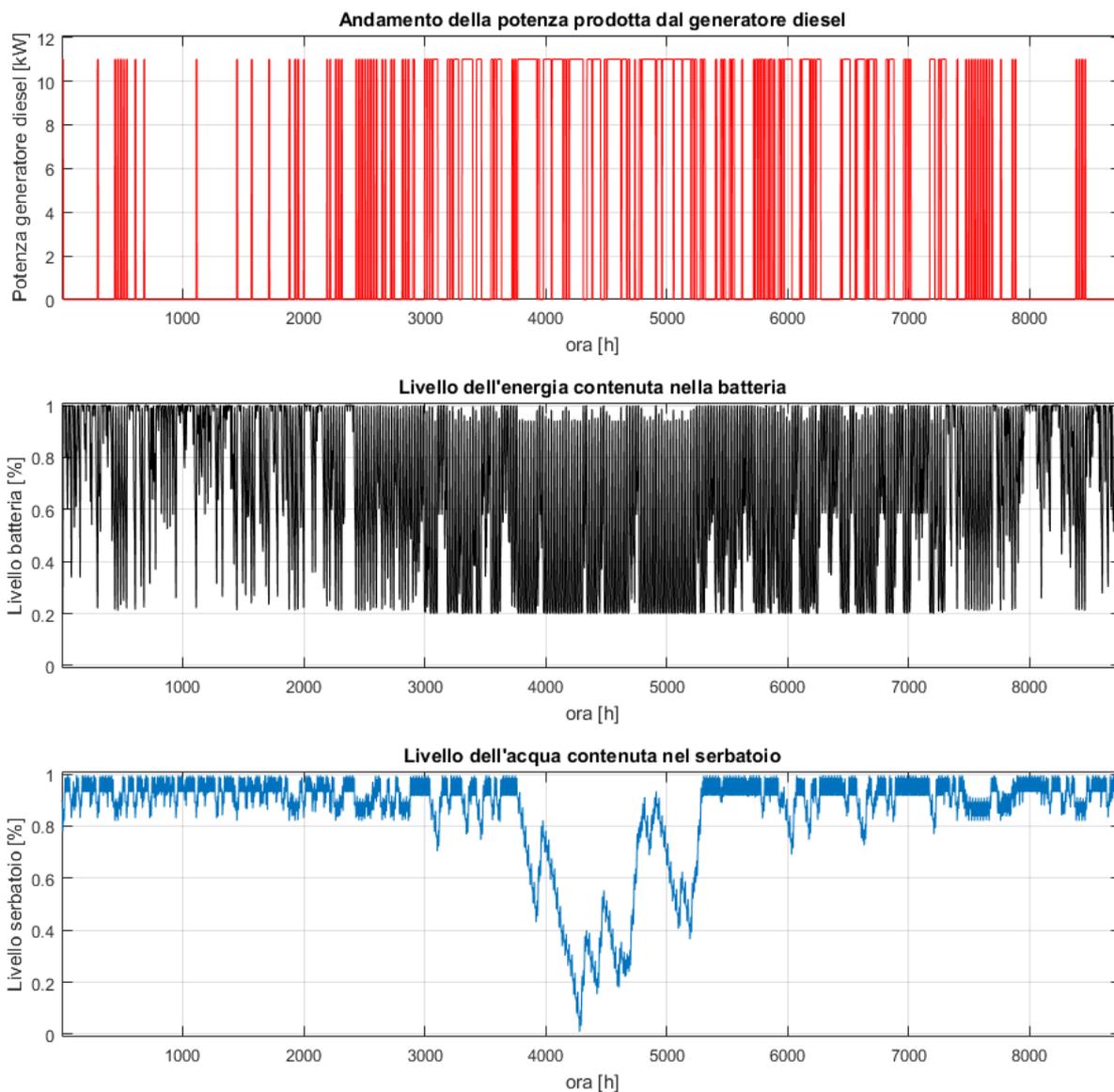


Figura 6.72. Grafici relativi al caso 1

Il volume del serbatoio di accumulo è pari al limite inferiore di 40 m³, il quale corrisponde ad un'autonomia di fornitura di acqua pari a due giorni estivi. Diminuendo il limite inferiore di questa variabile, il volume del serbatoio tenderebbe a diminuire, tuttavia ciò non sembra essere conveniente in quanto determinerebbe una riduzione dell'autonomia di fornitura dell'acqua in assenza di produzione. Inoltre osservando il grafico di figura

6.12 si vede che il livello del serbatoio scende fino quasi ad annullarsi, perciò riducendo il volume a parità di altre condizioni il tasso di soddisfazione della richiesta d'acqua diminuirebbe.

La capacità delle batterie è uguale a 500 kWh, mentre la potenza nominale del generatore diesel è di 11 kW. Come era stato osservato per questa tipologia d'impianto risulta conveniente ridurre la potenza nominale del generatore diesel ed aumentare la capacità delle batterie e la potenza installata degli impianti di produzione di energia da fonte rinnovabile.

La copertura della richiesta d'acqua è totale, mentre il tasso di soddisfazione del fabbisogno elettrico è pari al 95%, ossia pari al limite inferiore imposto come vincolo per questo risultato. La percentuale di energia rigettata è del 22%, abbastanza più basso del valore limite di 35% che è stato imposto come vincolo.

Volendo ottenere un tasso di copertura del carico elettrico superiore al 95% senza però aumentare la percentuale di energia rigettata, è stata eseguita una seconda ottimizzazione con i seguenti vincoli:

- Tasso di copertura della domanda idrica tra 98% e 100%;
- Tasso di copertura del carico elettrico tra 98% e 100%;
- Percentuale di energia rigettata inferiore a 25%.

I valori delle variabili di ottimizzazione e degli indici tecnico-economici che si ottengono sono riportati nelle seguenti tabelle.

Tabella 6.76. Risultati delle variabili di ottimizzazione (caso 2)

Variabile	Valore ottimale
Numero turbine eoliche	1
Area totale impianto fotovoltaico [m ²]	1196
Potenza nominale osmosi inversa [kW]	4
Volume serbatoio [m ³]	40
Capacità batterie [kWh]	500
Potenza nominale generatore diesel [kW]	25

Tabella 6.77. Risultati degli indici tecnico-economici (caso 2)

Costo acqua [€/m ³]	Costo energia [€/kWh]	PB [anni]	VAN [€]	TIR [%]	F_ds [%]	F_el [%]	F_rej [%]
2.02	0.23	3.1	1,613,475	24.49	100	98.01	20.3

Si osserva che, per aumentare il tasso di soddisfazione del fabbisogno di energia elettrica senza determinare un aumento della percentuale di energia rigettata, la superficie totale

dell'impianto fotovoltaico (quindi la potenza installata) viene ridotta mentre la potenza nominale del generatore diesel aumenta. Questo determina un aumento della produzione di energia da parte del generatore diesel, che presenta quindi un maggior consumo di combustibile rispetto alla configurazione precedente. Infatti in questa situazione vengono utilizzati circa $1.48 \cdot 10^8$ l/anno di combustibile mentre nella configurazione precedente circa $6.54 \cdot 10^7$ l/anno. Conseguentemente il VAN dell'investimento diminuisce, mentre il costo dell'acqua dissalata aumenta di 0.14 €/m³ e il costo dell'energia elettrica aumenta di 0.04 €/kWh. In questa situazione è il costo dell'acqua che subisce un aumento maggiore.

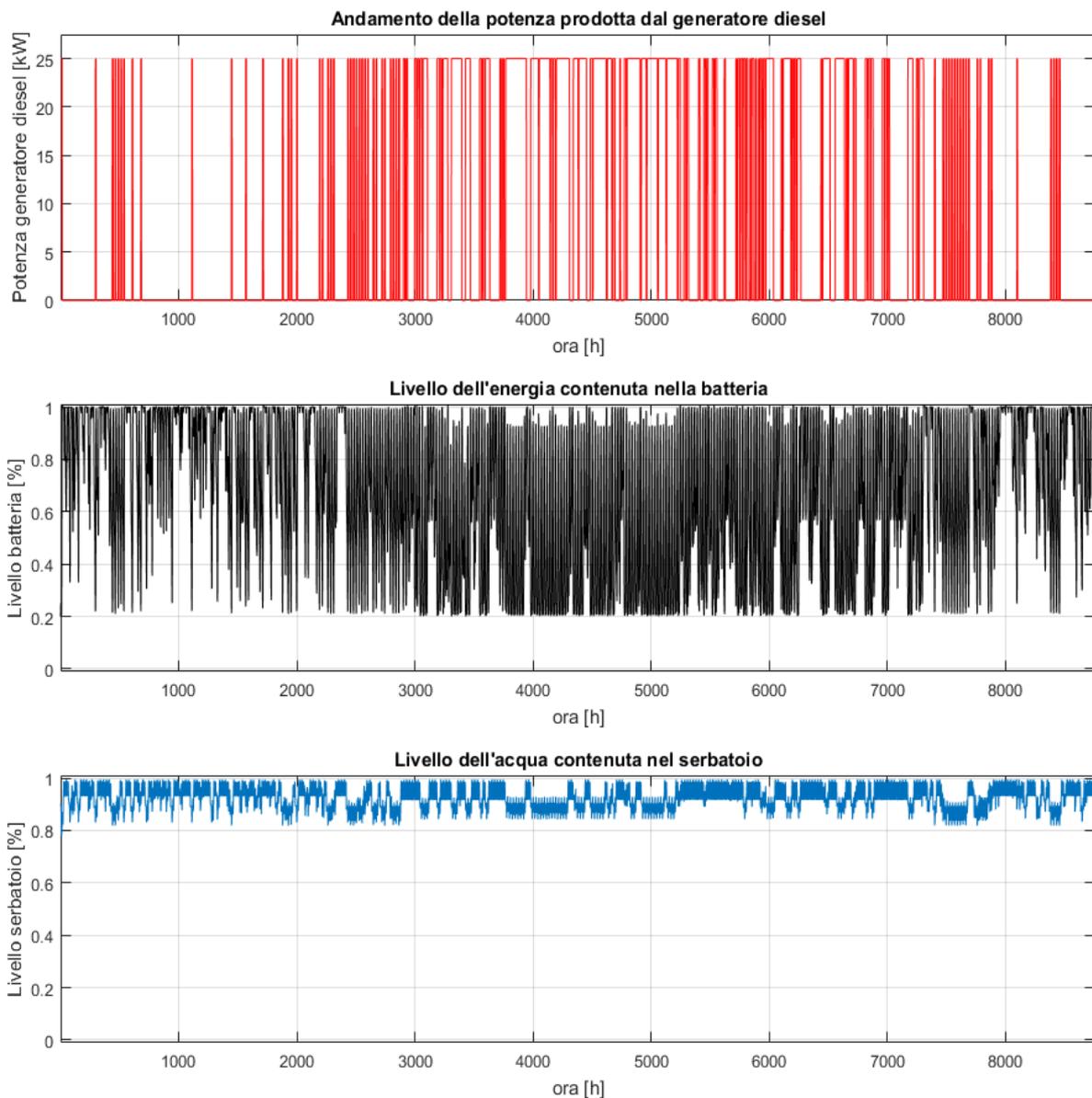


Figura 6.73. Grafici relativi al caso 2

Dal grafico relativo al livello dell'acqua nel serbatoio di figura 6.13 si osserva che tale livello non scende mai al di sotto dell'80% del volume, in quanto viene fornita maggiore energia dal generatore diesel.

In conclusione è più complicato realizzare la soddisfazione totale del fabbisogno di energia elettrica volendo mantenere bassi i costi dell'acqua e dell'energia e volendo contemporaneamente mantenere bassa anche la percentuale di energia rigettata senza eccedere con il dimensionamento del sistema di accumulo. Considerando che il costo di approvvigionamento d'acqua dolce dei luoghi isolati, i quali presentano scarsità di tale risorsa, è generalmente elevato (nel caso studiato in questa tesi è di 5-8 €/m³), quindi anche un costo di circa 2 €/m³ risulta essere conveniente.

Dunque i risultati ottenuti con questo nuovo caso di studio sono plausibili, perciò il modello realizzato può essere utilizzato anche per studiare altri casi in cui viene richiesta produzione di acqua dissalata e generazione di energia elettrica.

Conclusioni

Il lavoro di tesi che è stato condotto si è posto come scopo la realizzazione attraverso il software Matlab-Simulink di un modello d'impianto per la dissalazione dell'acqua di mare e la generazione di energia elettrica che utilizzi delle fonti di energia rinnovabile. Un impianto di questo tipo è adatto ad essere installato in un luogo isolato, con scarse riserve d'acqua dolce, ma con elevata disponibilità d'acqua salata e abbondante presenza della fonte eolica e solare. Le isole Egee rappresentano il contesto adatto per questo studio, in particolare l'isola di Milos, la quale presenta un'estensione media ed un numero di abitanti pari a circa 5000.

L'impianto studiato è costituito da un impianto eolico, un impianto fotovoltaico, un impianto di dissalazione ad osmosi inversa, un serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua dissalata, un sistema di batterie per l'accumulo dell'energia ed un generatore diesel ausiliario. È stata scelta l'osmosi inversa come tecnologia per la dissalazione, in quanto è adatta ad un impianto di taglia media e perché si accoppia bene con le fonti di energia rinnovabile. La simulazione del funzionamento dell'impianto è stata eseguita considerando un intero anno.

È da sottolineare che la domanda d'acqua ed il fabbisogno elettrico subiscono entrambi un notevole aumento in estate, perché in questo periodo il numero di persone presenti sull'isola raddoppia a causa del turismo. Per tale motivo le due curve citate presentano entrambe un picco abbastanza elevato in estate. Questa forte variabilità dei carichi, infatti, è stata una delle criticità riscontrate nel dimensionamento del sistema.

Inizialmente è stata studiata la configurazione d'impianto in cui viene solamente dissalata l'acqua di mare senza soddisfare il carico elettrico, in modo tale da confrontare i risultati ottenuti con quelli riportati in [1] e quindi poter validare il modello realizzato. Rispetto al modello riportato in [1], in cui l'impianto di osmosi inversa presenta per semplicità un consumo di energia elettrica medio costante pari a 3 kWh/m^3 , nel modello realizzato in questa tesi è stato considerato un consumo variabile con il carico, rendendo così il modello più aderente alla realtà.

Dai risultati ottenuti è stato osservato che in prossimità del picco della domanda idrica la produzione di acqua dissalata è bassa, a causa dell'assenza prolungata della risorsa eolica. L'aumento della domanda e l'abbassamento della produzione determinano un progressivo svuotamento del serbatoio, il quale in corrispondenza del picco della richiesta d'acqua si ritrova ad essere quasi completamente scarico. Per ridurre tale problema è stato necessario aumentare la potenza installata dell'impianto fotovoltaico rispetto a quello eolico.

Successivamente sono stati introdotti nel modello il carico elettrico ed il generatore diesel. A tal proposito sono state studiate due diverse configurazioni. Nella prima configurazione il generatore diesel lavora a carico variabile, producendo l'energia elettrica che gli impianti a fonte rinnovabile e le batterie non riescono a fornire al carico elettrico. Nella seconda il generatore diesel entra in funzione lavorando a carico nominale quando viene raggiunto il livello minimo di energia delle batterie e fornisce l'energia prodotta sia all'impianto di dissalazione sia al carico elettrico; il generatore termina di funzionare quando le batterie sono completamente cariche. È stato visto che la seconda configurazione è più vantaggiosa, in quanto permette di mantenere elevati i tassi di copertura dei due carichi utilizzando un generatore diesel di potenza più contenuta. Inoltre il costo di produzione dell'energia che si ottiene è più basso.

L'individuazione delle taglie ottimali dei componenti d'impianto non è immediata, perché esse si influenzano a vicenda in maniera che è difficile prevedere. Pertanto è stata eseguita un'ottimizzazione mediante l'algoritmo genetico presente in Matlab sia dell'impianto di sola dissalazione sia di quello di dissalazione e generazione di energia elettrica.

Nel primo caso la soluzione ottimale presenta un costo di dissalazione dell'acqua pari a 1.88 €/m³, con un tasso di copertura della domanda idrica pari al 94% ed una percentuale di energia rigettata del 54%. Nel secondo caso il costo di dissalazione dell'acqua è di 1.93 €/m³, con un tasso di copertura della domanda idrica pari al 95.47% ed una percentuale di energia rigettata del 35%. Considerando che la quantità mancante d'acqua necessaria alla copertura totale della domanda idrica deve essere comprata al prezzo di 5 €/m³, il costo medio dell'acqua risulta essere pari a 2.07 €/m³ in entrambi i casi.

Inoltre con l'aggiunta del carico elettrico e del generatore diesel la percentuale di energia rigettata è stata notevolmente ridotta. Questo è dovuto al fatto che nella prima configurazione la potenza totale installata degli impianti di produzione dell'energia a fonte rinnovabile è pari a 2.5 volte la potenza nominale dell'impianto di dissalazione, mentre nel secondo caso è pari a 1.6 volte la somma del carico elettrico di picco e della potenza nominale dell'impianto di osmosi inversa. Inoltre nel secondo caso la capacità delle batterie è circa 4 volte superiore a quella del primo caso. È stato evidenziato che le batterie sono un componente abbastanza costoso, infatti la configurazione di sola dissalazione presenta un valore basso della capacità di accumulo delle batterie, altrimenti il costo di dissalazione dell'acqua aumenterebbe troppo. Un aumento non sembra essere vantaggioso, anche perché le batterie funzionano solo in estate. Nella seconda configurazione, grazie all'aggiunta del carico elettrico, le batterie vengono utilizzate più frequentemente e questi fattori rendono conveniente l'aumento della capacità di accumulo senza incrementare di molto il costo di dissalazione dell'acqua.

Si evince quindi che l'aggiunta del carico elettrico permette di sfruttare in maniera migliore l'energia prodotta da fonti rinnovabili, evitando di sovradimensionare eccessivamente gli impianti di produzione dell'energia, grazie anche alla possibilità di installare una maggiore capacità di accumulo del sistema di batterie.

Il costo di produzione dell'energia è pari a 0.24 €/kWh ed il tasso di copertura del carico elettrico è del 95%. Il costo d'investimento totale è di circa $20 \cdot 10^6$ €, il VAN che si ottiene è circa pari a $65 \cdot 10^6$ €, mentre l'investimento viene recuperato in poco più di due anni.

La principale difficoltà riscontrata è stata il dimensionamento del serbatoio di stoccaggio dell'acqua, in quanto esso rimane quasi completamente carico per molto tempo con un tasso di ricambio dell'acqua al suo interno abbastanza modesto e viene scaricato completamente solamente in estate. Dunque, considerando il volume ottimale di 20000 m³, si può constatare che per molto tempo la capacità di stoccaggio del serbatoio è molto elevata. Tuttavia tale volume di stoccaggio è necessario in quanto la domanda idrica subisce un forte aumento in corrispondenza del periodo estivo a causa del turismo, che fa raddoppiare il numero di persone presenti sull'isola. Dunque, per ottenere un maggior ricambio d'acqua all'interno del serbatoio, si è pensato di fermare l'impianto di dissalazione per un periodo di tre settimane in inverno in modo tale da svuotare il serbatoio quasi totalmente almeno un'altra volta durante l'anno. Durante questo periodo è inoltre possibile effettuare tutti i lavori di manutenzione necessari all'impianto di dissalazione.

In ultima analisi è stato testato l'algoritmo di ottimizzazione sia variando la tolleranza della funzione di fitness e della funzione di vincolo sia variando la popolazione ed il numero di generazioni, valutando in entrambi i casi anche il tempo impiegato. Nel primo caso è stato visto che la tolleranza di 10^{-4} rappresenta il valore minimo per avere risultati accettabili nel minor tempo possibile; con essa l'ottimizzazione impiega circa 17 ore per terminare. Nel secondo caso, invece, è stato visto che i valori minimi di popolazione e generazioni necessari affinché l'algoritmo giunga a convergenza e presenti risultati accettabili è di 200 per entrambi. In questo caso l'ottimizzazione termina in circa 26 ore. Infine il modello è stato utilizzato per studiare altri due casi, che presentano diverse curve di fabbisogno di energia elettrica e richiesta d'acqua. I risultati ottenuti sono plausibili, perciò si può concludere che l'utilizzo del modello può essere esteso anche ad altri casi di studio.

Appendice

Modello di trasposizione di Liu & Jordan

La radiazione globale incidente su un piano inclinato G_β è correlata alla radiazione globale sull'orizzontale G_h attraverso il modello di trasposizione di Liu & Jordan, descritto in [31].

$$\frac{G_\beta}{G_h} = \left(1 - \frac{G_{d,h}}{G_h}\right) R_b + \frac{1}{2} \left[\frac{G_{d,h}}{G_h} (1 + \cos \beta) + \rho_g (1 - \cos \beta) \right]$$

dove β è l'angolo di inclinazione del piano, ρ_g è la riflessività del terreno e R_b è il rapporto tra l'irradianza diretta sul piano inclinato e quella sul piano orizzontale, nonché il rapporto tra il coseno dell'angolo d'incidenza sul piano inclinato θ_β e il coseno dell'angolo d'incidenza sull'orizzontale θ_h , che sono determinati mediante le relazioni:

$$\cos \theta_h = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_\beta = & \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \beta \\ & \cdot \sin \gamma \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \sin \phi \cdot \cos \beta \cdot \sin \delta - \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \delta \end{aligned}$$

Tuttavia per le superfici situate nell'emisfero settentrionale ed orientate a sud ($\gamma=0^\circ$), quest'ultima relazione diventa:

$$\cos \theta_\beta = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta$$

Nelle relazioni appena esposte ϕ è la latitudine del luogo dove è posta la superficie inclinata, δ è la declinazione solare e ω è l'angolo orario.

La declinazione solare, espressa in gradi, viene calcolata mediante la formula di Cooper:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

dove n rappresenta il numero del giorno considerato.

L'angolo orario, anch'esso espresso in gradi, viene calcolato mediante la seguente relazione:

$$\omega = 15(\vartheta_s - 12)$$

dove ϑ_S è l'ora solare espressa in ore, la quale viene determinata attraverso la relazione:

$$\vartheta_S = \vartheta_{st} + 4(L_{loc} - L_{st}) + E$$

In questa relazione il termine ϑ_{st} è l'ora standard, L_{st} è la longitudine del meridiano standard locale per il fuso orario del luogo considerato, espressa in gradi est, L_{loc} è la longitudine del luogo considerato anch'essa espressa in gradi est, E è la differenza espressa in minuti tra l'ora solare e l'ora standard ed è determinata dall'equazione del tempo:

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

Avendo considerato l'isola di Milos come luogo per la raccolta dei dati climatici, di seguito vengono riportati i dati riguardanti le caratteristiche della zona considerata e della superficie:

- Latitudine 36.7458 °N;
- Longitudine 24.4186 °E;
- Meridiano standard locale 30 °E;
- Inclinazione della superficie 29 °;
- Orientazione della superficie 0 °;
- Riflessività del terreno 0.2.

Utilizzando le equazioni del modello sopra esposte, viene quindi calcolata l'irradianza globale sul piano inclinato per ogni ora dell'anno.

Bibliografia

- [1] 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.
- [2] Kalogirou, S. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(3), pp.242-281
- [3] Rognoni, M. (2010). *La dissalazione dell'acqua di mare*. [Palermo]: Flaccovio.
- [4] Waterfootprint.org. (2018). *What is a water footprint?*. [online] Available at: <https://waterfootprint.org/en/water-footprint/what-is-water-footprint/>
- [5] Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2011) National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No. 50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- [6] OECD (2012), *OECD Environmental Outlook to 2050*, OECD Publishing.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Thomson, A. (2003). *Reverse-osmosis desalination of seawater powered by photovoltaics without batteries*. Loughborough: Loughborough University.
- [11] Zhao, S., Zou, L., Tang, C. and Mulcahy, D. (2012). Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges. *Journal of Membrane Science*, 396, pp.1-21.

- [12] Luo, H., Wang, Q., Zhang, T., Tao, T., Zhou, A., Chen, L. and Bie, X. (2014). A review on the recovery methods of draw solutes in forward osmosis. *Journal of Water Process Engineering*, 4, pp.212-223.
- [13] García-Rodríguez, L. (2003). Renewable energy applications in desalination: state of the art. *Solar Energy*, 75(5), pp.381-393.
- [14] 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.
- [15] Macchi, E., Campanari, S. and Silva, P. (2005). *La microcogenerazione a gas naturale*. 1st ed. Milano: Polipress, pp.229-239.
- [16] Diaf, S., Diaf, D., Belhamel, M., Haddadi, M. and Louche, A. (2007). A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*, 35(11), pp.5708-5718.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Dennis Barley, C. and Byron Winn, C. (1996). Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems. *Solar Energy*, 58(4-6), pp.165-179.
- [20] Climate.onebuilding.org.
(2018). *\climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\GRC_Greece*. [online]
Available at:
http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/GRC_Greece/index.html.

- [21] Re.jrc.ec.europa.eu. (2018). *PV potential estimation utility*. [online] Available at: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>.
- [22] WATER TEMP. (2018). *WATER TEMP | La temperatura del mare, dell'aria e la pioggia*. [online] Available at: <http://www.water-temp.com/>.
- [23] 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.
- [24] GlobalPetrolPrices.com. (2018). *Grecia i prezzi del diesel, 22-ottobre-2018 | GlobalPetrolPrices.com*. [online] Available at: https://it.globalpetrolprices.com/Greece/diesel_prices/.
- [25] Hyfluxmembranes.com. (2018). [online] Available at: <http://www.hyfluxmembranes.com/images/documents/brochures/sms-eng.pdf>.
- [26] Bauer, L. (2018). *DDIS DDIS60 - 800,00 kW - Wind turbine*. [online] En.wind-turbine-models.com. Available at: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/568-ddis-ddis60#datasheet> [Accessed 25 Oct. 2018].
- [27] S.R.L., E. (2018). *MONO 60 High Efficiency Modulo Fotovoltaico Monocristallino 60 celle EU - High Efficiency | EXE Solar - Produttore Moduli fotovoltaici - Made in Europa*. [online] Exesolar.com. Available at: <https://www.exesolar.com/it/cms/mono-60-high-efficiency/17.html>.
- [28] McCall, J. (2005). Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184(1), pp.205-222.
- [29] It.mathworks.com. (2019). *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink*. [online] Available at: <https://it.mathworks.com>.
- [30] Stoppato, A., Benato, A., Destro, N. and Mirandola, A. (2016). A model for the optimal design and management of a cogeneration system with energy storage. *Energy and Buildings*, 124, pp.241-247.
- [31] Liu, B.Y. H., Jordan, R.C. (1962). *Daily insolation on surfaces tilted towards the equator*. *Transactions ASHRAE*, 67, pp. 526–541