

Università degli studi di Padova
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Tesi di Laurea Magistrale
Studio e dimensionamento di un sistema per la dissalazione
e la generazione di energia con accumulo in aree rurali isolate

Relatore: Stoppato Anna
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Laureando: Duci Carlo

Anno Accademico 2012-2013

Sommario

Con l'aggravarsi dell'intensità dei fenomeni legati al cambiamento climatico, come desertificazione, siccità e alterazione delle stagioni l'approccio sostenibile alla scarsità idrica e energetica passa da valore aggiunto a unica soluzione possibile per queste problematiche.

In questo lavoro ho considerato una situazione di difficoltà di approvvigionamento idrico simulando il funzionamento di un impianto che permetta la dissalazione dell'acqua attraverso l'energia elettrica fornita da un impianto fotovoltaico; il progetto prevede un sistema di accumulo idroelettrico del surplus di energia prodotta durante il funzionamento diurno.

Sono state ipotizzate, per il sistema di accumulo, sei configurazioni impiantistiche differenti: ognuna è stata modellizzata e attraverso l'analisi dei flussi di potenza è stata dimensionata e ne è stato valutato il costo di investimento.

La configurazione di riferimento è stata scelta su base economica e mantenendo questo schema impiantistico attraverso un'ottimizzazione sono state dimensionate le taglie delle macchine.

In conclusione è stata valutata la fattibilità economica attraverso un piano di investimento; ad ogni modo è da considerare che la natura di un impianto simile rientra in una logica non speculativa data il diritto imprescindibile di accesso alle fonti idriche.

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione | 5 |
| 1.1 | Le Risorse Idriche | 7 |
| 1.1.1 | Caratterizzazione delle risorse idriche | 8 |
| 1.1.2 | Distribuzione, Usi e Consumi | 9 |
| 1.1.3 | Fabbisogni e Accesso alle Risorse | 10 |
| 1.2 | La Dissalazione dell'Acqua di Mare | 11 |
| 1.2.1 | L'acqua Salata Non è Tutta Uguale | 12 |
| 1.2.2 | Tecnologie e Principi Fisici | 13 |
| 1.2.2.1 | Impianti Evaporativi | 15 |
| 1.2.2.2 | Tecnologie a flash | 15 |
| 1.2.2.3 | Tecnologie a multiplo effetto | 17 |
| 1.2.2.4 | Osmosi Inversa | 18 |
| 1.2.2.5 | Tecnologie Recenti in Fase di Studio | 22 |
| 2 | Struttura e Componenti del Sistema | 25 |
| 2.1 | Gli Aspetti Caratterizzanti | 26 |
| 2.2 | Descrizione dell'Impianto e delle Tecnologie | 27 |
| 2.2.1 | La Fonte di Energia - L'impianto Fotovoltaico | 27 |
| 2.2.2 | La Dissalazione - L'Osmosi Inversa | 28 |
| 2.2.3 | L'Accumulo Energetico | 28 |
| 2.2.4 | La Batteria di accumulatori elettrochimici | 29 |
| 2.2.5 | Utenze | 30 |
| 2.2.6 | Schema Impiantistico | 30 |
| 3 | Dimensionamento e Analisi del Sistema | 33 |
| 3.1 | Metodo | 34 |
| 3.2 | Fabbisogno Idrico | 35 |
| 3.3 | Dissalazione ad Osmosi Inversa | 35 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4 | Fabbisogno Elettrico | 36 |
| 3.5 | Sistema Fotovoltaico | 37 |
| 3.6 | Sistema di Accumulo dell'Energia | 41 |
| 3.6.1 | L'accumulo elettrochimico | 48 |
| 3.7 | Configurazioni impiantistiche | 49 |
| 3.7.1 | Configurazione 1: PAT e batteria | 50 |
| 3.7.2 | Configurazione 2: PAT senza batteria | 52 |
| 3.7.3 | Configurazione 3: due PAT e batteria | 53 |
| 3.7.4 | Configurazione 4: due PAT senza batteria | 55 |
| 3.7.5 | Configurazione 5: n macchine e batteria | 56 |
| 3.7.6 | Configurazione 6: n macchine | 59 |
| 3.7.7 | Configurazione 7: accumulo con sola batteria | 60 |
| 3.7.8 | Risultati | 60 |
| 4 | Analisi e Ottimizzazione Tecnoeconomica | 63 |
| 4.1 | Ottimizzazione | 67 |
| 4.2 | Verifica dei risultati di ottimizzazione | 72 |
| 5 | Considerazioni e Conclusioni | 75 |

Legenda dei Simboli e delle Abbreviazioni

| | |
|---------------|--|
| A_{PV} | Superficie impianto fotovoltaico [m ²] |
| A_{mod} | Superficie di un modulo fotovoltaico [m ²] |
| c_{bat} | Costo specifico accumulatore elettrochimico [€/kWh] |
| C_{min} | Costo d'investimento della configurazione più economica [€] |
| DoD | Depth of discharge [%] |
| E_{bat} | Energia immagazzinabile nella batteria [kWh] |
| E_{diur} | Energia richiesta dal carico durante le ore diurne [kWh] |
| E_{nott} | Energia richiesta dal carico durante le ore notturne [kWh] |
| $E_{PV,tot}$ | Energia prodotta durante un giorno dall'impianto fotovoltaico [kWh] |
| E_{serb} | Energia immagazzinabile nel serbatoio [kWh] |
| $H_{P,bep}$ | Prevalenza al best efficiency point della pompa [m] |
| $H_{T,bep}$ | Prevalenza al best efficiency point in modalità turbina [m] |
| h_{geod} | Altezza del bacino di accumulo [m] |
| n_{tot} | Numero moduli fotovoltaici necessari |
| n_{inv} | Numero inverter fotovoltaici |
| n_{PAT} | Numero di macchine idrauliche |
| $n_{inv,PAT}$ | Numero inverter per macchine sincrone |
| n_{sinc} | Numero di macchine sincrone |
| n_{asinc} | Numero di motori asincroni |
| P_{car} | Potenza istantanea richiesta dal carico |
| $P_{min,P}$ | Potenza minima di lavoro della pompa [kW] |
| $P_{n,P}$ | Potenza nominale della pompa [kW] |
| $P_{max,P}$ | Potenza massima di lavoro della pompa [kW] |
| $P_{min,T}$ | Potenza minima di lavoro della PAT in modalità di turbina [kW] |
| $P_{n,T}$ | Potenza nominale della PAT in modalità di turbina [kW] |
| $P_{max,T}$ | Potenza massima di lavoro della PAT in modalità di turbina [kW] |
| $P_{PV}(t)$ | Potenza istantanea fotovoltaica [kW] |
| P_{PV} | Potenza di picco dell'impianto fotovoltaico [kW] |
| $P_{surp}(t)$ | Potenza istantanea dell'irraggiamento |
| $P_{surp}(t)$ | Disavanzo tra la potenza fotovoltaica e quella richiesta dal carico [kW] |
| $P_u(t)$ | Curva di carico delle utenze [kW] |

| | |
|----------------|--|
| $Q_{P,bep}$ | Portata al best efficiency point della pompa [m] |
| $Q_{T,bep}$ | Portata al best efficiency point in modalità turbina [m] |
| Re | Numero di Reynolds |
| V_{bac} | Volume del bacino [m ³] |
| Δt | Istante temporale di base (10 minuti) |
| $\eta_{G,acc}$ | Rendimento globale del sistema di accumulo |
| $\eta_{max,P}$ | Rendimento massimo della pompa |
| η_{PV} | Rendimento modulo fotovoltaico |
| η_{bat} | Rendimento della batteria |

Capitolo 1

Introduzione

Il 2013 è stato dichiarato dalle Nazioni Unite “Anno internazionale della cooperazione nel settore idrico”. Questo evidenzia come oggi l'accesso alle risorse primarie non sia così scontato per tutta la popolazione mondiale. In questo lavoro di tesi mi sono proposto di sviluppare un sistema che, basandosi su tecnologie rinnovabili, permetta l'approvvigionamento idrico attraverso la dissalazione dell'acqua di mare. Parallelamente, si è deciso di sviluppare, per soddisfare anche il fabbisogno di energia elettrica, un sistema di accumulo dell'energia.

Il progetto è rivolto a tutte quelle realtà rurali con scarse risorse idriche ma con elevato irraggiamento solare. D'interesse sono quindi quei luoghi in prossimità di litorali a picco sul mare che non hanno la possibilità di connettersi alla rete elettrica. Queste caratteristiche permettono l'installazione di un dissalatore alimentato a energia solare ed un accumulo idroelettrico dell'energia.

Il sistema sfrutta l'irraggiamento solare come fonte primaria di energia. Durante le ore diurne parte dell'energia viene utilizzata dal dissalatore, parte è richiesta dalle utenze e il restante è accumulato. Il lavoro di tesi è volto a dimensionare ogni componente in modo che il sistema possa soddisfare i carichi idrici ed elettrici assicurando la maggior economicità possibile.

In una fase iniziale di studio sono state approfondite le tecnologie per la dissalazione in modo da individuare quella che meglio si adatti al progetto. Ho inoltre approfondito questioni collaterali come la natura delle risorse idriche, la loro distribuzione nel mondo ed i livelli di consumo.

Innanzitutto ho individuato un luogo ed i relativi fabbisogni. A titolo di esempio è stata scelta l'isola di Kasos, le cui peculiarità sono facilmente riscontrabili in molte altre isole del Mediterraneo: difficoltà di approvvigionamento idrico ed elettrico e presenza di falesie o rilievi prossimi al litorale. Le necessità su queste isole sono da considerarsi molto minori rispetto a realtà urbane economicamente sviluppate. Naturalmente le reali necessità vanno stimate caso per caso in relazione alle condizioni geo-climatiche e sociali; in questo lavoro, a titolo

esemplificativo, ho ipotizzato che il bacino di utenza sia di cinquanta abitazioni. Pertanto, adattando i dati raccolti in letteratura, è stato possibile determinare le curve di carico necessarie al dimensionamento dei sistemi.

Nello sviluppo della tesi ho proceduto per fasi determinando inizialmente la taglia del dissalatore. Date le piccole quantità di acqua da dissalare si è optato per un impianto ad osmosi inversa in quanto impiantisticamente semplice e di facile manutenzione. La fornitura di acqua è l'obiettivo principale quindi, il suo funzionamento è prioritario rispetto alla fornitura di energia elettrica.

Successivamente sono state ipotizzate sette modalità impiantistiche per l'accumulo dell'energia non assorbita dai carichi. Si è scelto di valutare sia l'utilizzo di sistemi ad accumulo elettrochimico sia di sistemi micro-idroelettrici. A quest'ultimo si è giunti data la grande disponibilità di acqua nelle vicinanze e per le opere di presa già necessarie per l'impianto di dissalazione. Entrambe le tecnologie presentano vantaggi e svantaggi, ho quindi ipotizzato soluzioni ibride che compensassero i vari difetti. Le configurazioni differiscono per quantità di macchine idrauliche e presenza di accumulo elettrochimico. L'analisi e la scelta delle differenti ipotesi impiantistiche si sono rivelate la parte più complessa del progetto, per questo mi sono dedicato con maggior attenzione al sottosistema di accumulo. Infatti le inefficienze di conversione dell'energia ripercuotendosi sulla quantità di energia primaria influenzano il rendimento di accumulo e quindi, dimensioni e costo dell'impianto.

Per poter scegliere la configurazione che, mediando tra miglior rendimento e costi impiantistici, assicuri la maggior economicità si è utilizzato il software di calcolo MATLAB. Modellando analiticamente le varie macchine e la loro interconnessione il codice riproduce il funzionamento delle varie configurazioni di accumulo. Simulando l'andamento temporale dei flussi di potenza e imponendo al codice di chiudere il bilancio energetico si individuano per ogni ipotesi impiantistica i parametri che le caratterizzano: rendimento di accumulo, dimensione dell'impianto fotovoltaico e dimensione del bacino di accumulo.

Con i dati raccolti, l'implementazione di funzioni di costo, e con l'ausilio di un foglio di calcolo vengono individuati per ogni configurazione i costi d'investimento. Infine analizzando la soluzione più economica e mantenendo la logica di funzionamento e la struttura impiantistica, attraverso un processo di ottimizzazione sono state calcolate le taglie delle macchine in modo

Nel lavoro di tesi ci si è limitati ad analizzare il funzionamento del sistema durante le 24h, utilizzando i dati di irraggiamento medio mensile del mese di Aprile. Ciò comporta, durante i mesi invernali una minor disponibilità di energia mentre un surplus durante quelli estivi. Si può però ipotizzare che i fabbisogni idrici si riducano durante i mesi freddi mentre siano maggiori durante quelli caldi. Si è inoltre evitato di sovradimensionare l'accumulo in per far fronte ai periodi di basso irraggiamento.

L'elaborato è suddiviso in una parte iniziale che raccoglie le informazioni utili alla comprensione dei problemi di approvvigionamento idrico e delle tecnologie di dissalazione. Successi-

vamente si affronta il dimensionamento dei sottosistemi per stimare il costo d'investimento, e infine vi è l'analisi tecnico economica e l'ottimizzazione del sistema di accumulo.

1.1 Le Risorse Idriche

L'acqua è essenziale. È necessaria a tutti gli organismi e presente in tutti gli ecosistemi naturali e antropizzati, è la base per la vita e ne condiziona lo sviluppo: non è un caso che la maggior parte delle civiltà siano sorte abbastanza vicino all'acqua da trarne beneficio, ma abbastanza lontano per difendersi dalle sue intemperanze. L'acqua è una risorsa rinnovabile teoricamente illimitata che attraverso un ciclo chiuso (ciclo idrologico) alimentato dall'energia del sole, viene distribuita sulla terra in forma liquida, solida e allo stato di vapore. La maggior riserva di acqua è costituita dagli oceani che ne raccolgono il 97,25%, il rimanente è accumulato nei ghiacciai (2,05%), nelle acque sotterranee (0,68%), in laghi, nell'umidità del suolo, nell'atmosfera, nei corsi d'acqua e nella biosfera [1].

La presenza dell'uomo moderno ha modificato sia il ciclo idrico sia la composizione delle risorse, sia la qualità delle risorse idriche. In particolare, in seguito alla rivoluzione industriale, le attività umane hanno portato ad un aumento della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera che intensifica l'effetto serra. L'aumento delle temperature si ripercuote in un tasso di evaporazione maggiore causando eventi meteorologici più intensi e nello scioglimento dei ghiacci montani e polari. Il sovra sfruttamento delle risorse e dei terreni, nonché l'attività industriale concentrata hanno portato ad un graduale degradamento della qualità dell'acqua di falda. Un ulteriore problema diffuso è l'abbandono dei pozzi che costituisce un possibile punto di inquinamento dell'acqua sotterranea [2].

Oltre ai fattori antropomorfi, il problema principale è però la distribuzione e l'accesso all'acqua potabile. Precipitazioni e, di conseguenza, acque sotterranee non sono distribuite uniformemente sul pianeta. Le zone desertiche sono quelle meno ospitali sia per le temperature estreme, sia per la scarsità di acqua, occupano il 30% delle terre emerse e sono caratterizzate da alta pressione costante, situazione che sfavorisce le precipitazioni. La scarsità di acqua è un fattore caratterizzante, oltre che dei deserti, delle piccole isole, in cui però a differenza dei primi vedono una gran disponibilità di acqua, ma non potabile [3]. Non sempre la presenza di acqua significa possibilità di soddisfare le necessità umane minime: tra difficoltà di approvvigionamento e qualità dell'acqua si stima che nel 2015 circa 672 milioni di persone non avranno accesso ad una fonte idonea di acqua potabile [4, 6]. Oltre alla quantità complessiva di precipitazioni che cadono su un determinato territorio è importante percepirne la distribuzione temporale: un clima tropicale presenta precipitazioni abbondanti ma concentrate in un unico intervallo temporale. Di conseguenza solo una piccola frazione risulta utilizzabile, men-

tre un clima temperato come il nostro a fronte di precipitazioni minori ma distribuite nel tempo consente uno sfruttamento maggiore [3].

1.1.1 Caratterizzazione delle risorse idriche

Le risorse idriche, in particolare quantità e qualità, variano geograficamente, in funzione della piovosità, della presenza di fiumi, laghi o mari e in funzione della conformazione geologica del terreno che convogliando o disperdendo le infiltrazioni nel terreno permette in presenza di uno strato impermeabile l'accumulo di acqua nel sottosuolo. La maggior di quelle destinabili ad uso umano sono caratterizzate da un bacino sotterraneo e si rigenerano grazie al processo di infiltrazione-accumulo alimentato dalle precipitazioni piovose. Queste riserve di acqua sono comunemente chiamate falde idriche o acquiferi e rappresentano la fonte primaria di acqua potabile nel mondo [3].

Falda Freatica La falda freatica è il tipo di acquifero più diffuso in cui l'acqua delle precipitazioni o dei fiumi è trasportata in profondità per effetto della gravità finché non raggiunge un substrato impermeabile solitamente composto da argilla che ne arresta la discesa. La falda, delimitata inferiormente ma non superiormente, è quindi soggetta a variazioni di livello in relazione alle precipitazioni atmosferiche.

Falda Artesiana A differenza di quello freatico un acquifero artesianico è caratterizzato da uno strato impermeabile anche sulla superficie superiore, la riserva di acqua non è rigenerata dalle piogge sovrastanti ma la morfologia del terreno convoglia l'acqua verso il bacino. I condotti naturali, trasportando l'acqua come in una condotta forzata, mettono in pressione la falda.

Acqua Fossile Esistono accumuli di acqua detti fossili a grandi profondità nel sottosuolo che non sono collegati con la superficie e quindi non soggetti ad un ciclo di ricarica idrica. Questi acquiferi hanno origine millenaria, spesso l'acqua contenuta risale ad ere glaciali e a causa di mutamenti geologici è stata confinata nel sottosuolo. Lo sfruttamento di questi acquiferi considerato per la sua natura non rinnovabile al pari di un giacimento minerario, è diffuso soprattutto in paesi desertici e ricchi in quanto necessita di profonde e costose perforazioni. Ad esempio paesi mediorientali come Arabia Saudita negli anni Settanta per rendersi autosufficienti sovvenzionarono fortemente l'agricoltura irrigando con acqua pompata da falde idriche fossili, si trovano ora costretti a ridurre le coltivazioni per evitare il prosciugamento totale delle riserve idriche.

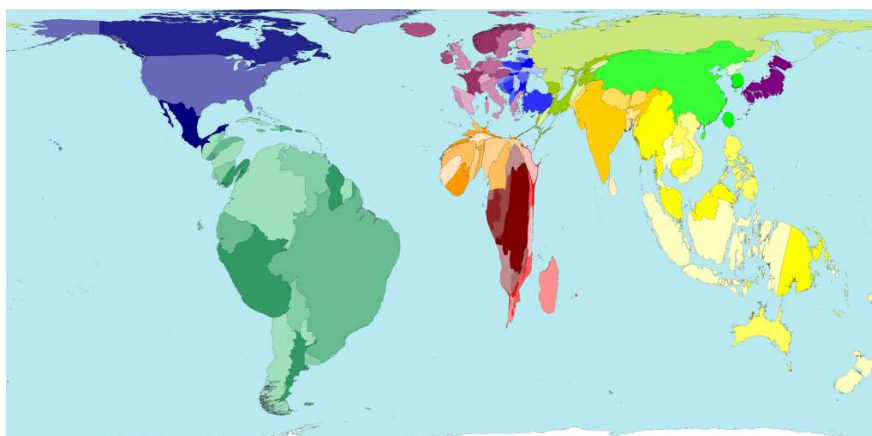


Figura 1.1: Distribuzione delle risorse idriche mondiali percentuali sul totale mondiale

Sorgenti Ulteriori fonti di acqua potabile o a fini agricoli sono le sorgenti, affioramenti naturali di acqua attraverso la roccia. Il loro flusso dipende in maniera considerevole dalla morfologia del territorio ed è normalmente influenzato dalle precipitazioni.

1.1.2 Distribuzione, Usi e Consumi

Le risorse idriche, sia rinnovabili sia di origine fossile sono distribuite irregolarmente nel mondo; piovosità e localizzazione geografica determinano in prima approssimazione l'abbondanza delle risorse: ai poli, acqua e ghiaccio sono presenti in maniera maggiore, mentre le zone all'altezza dei due tropici sono tipicamente povere di precipitazioni. Un'idea della distribuzione delle risorse idriche nel mondo è data dalla figura 1.1. In Sud America e Oceania sono i continenti con la maggior disponibilità di acqua dolce che si aggira tra i 10000 e 50000 metri cubi l'anno, quantità simili sono accessibili in Canada e Stati Uniti. In Europa la disponibilità varia molto tra le grandi quantità nelle regioni montuose dell'arco alpino e dell'area scandinava dell'ordine dei 10000 metri cubi e le disponibilità medio basse (2000 m³/anno) delle regioni dell'est Europa (Germania, Polonia e Romania) [1].

Ogni anno al mondo l'uomo consuma 3893,8¹ milioni di metri cubi di acqua utilizzata oltre che a fini domestici, nel settore agricolo e in quello industriale. I primi consumatori per quantità sono l'agricoltura e l'allevamento: l'irrigazione di colture come cereali, frutta e verdura destinate al consumo umano e di quelle destinate a consumo animale ammonta sommando il consumo diretto di animali da macello, al 70% del totale prelevato. L'idea che l'acqua non sia solo consumata direttamente, ma sia presente anche all'interno dei beni che acquistiamo è rappresentato

¹I dati relativi ai consumi di acqua provengono dalla Banca Mondiale e si riferiscono all'anno 2011 - <http://data.worldbank.org/indicator>

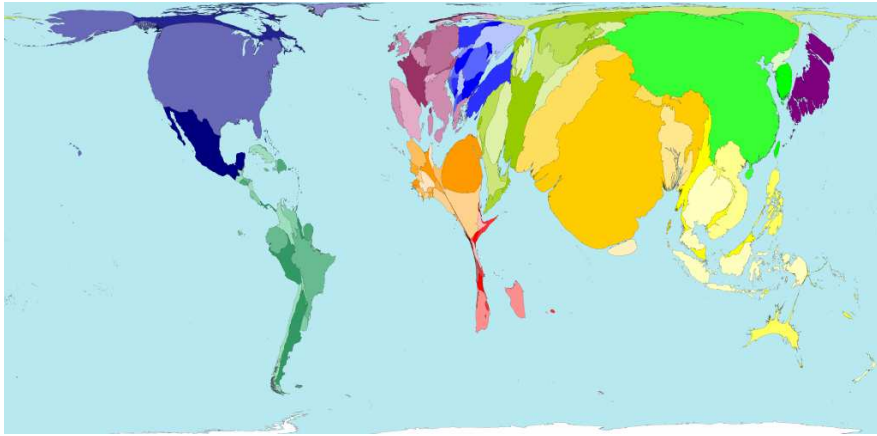


Figura 1.2: Consumi idrici mondiali

dal concetto di acqua virtuale, o water footprint: questo indicatore prende in considerazione non solo l'uso diretto, ma anche l'acqua utilizzata per la produzione di alimenti e nei processi industriali, ad esempio un kg di carne bovina richiede 15415 litri, uno di mele 822 mentre un kg di riso 2497 litri².

In termini di consumi il settore industriale si classifica al secondo posto con un estrazione del 18,2% (circa 700 miliardi di metri cubi), i cui settori più assetati sono quello della carta, dell'industria metallurgica, di quella chimica e dei processi di produzione di energia. Infine quello domestico comprensivo dell'acqua a fini alimentari, di quella usata nel settore terziario e di quella a uso domestico ammonta a 450 miliardi di metri cubi (11,7%), con una media mondiale pro-capite di circa 52 metri cubi l'anno [1]. La figura 1.2 rappresenta ciascun paese con una superficie proporzionale al proprio consumo di acqua rispetto a quello medio mondiale³.

1.1.3 Fabbisogni e Accesso alle Risorse

Purtroppo la relazione tra maggior disponibilità di risorse e maggior consumo è da ritenersi inesatta, come invece ci si può aspettare può ritenersi valida la proporzione consumi-industrializzazione. Esistono ancora molte realtà in cui qualità e quantità dell'acqua non sono sufficienti ad assicurare condizioni minime di benessere, si stima che circa un miliardo di persone non abbia accesso ad una fonte di acqua adeguata. La zona del mondo in cui la popolazione soffre maggiormente carenze idriche è l'Africa sub-Sahariana in cui il 60 % della popolazione non ha

²I valori dei waterfootprints menzionati provengono dall'omonimo sito (<http://www.waterfootprint.org> - Product Water Footprint)

³Le figure 1.1 e 1.2 provenienti da worldmapper.org sono basate su dati del United Nation Environment Programme

accesso ad una fonte sicura di acqua, mentre in generale nei paesi in via di sviluppo in media circa l'80% delle persone vive sotto la soglia di benessere idrico [4, 6].

Cinque sono i litri per il fabbisogno fisico giornaliero, mentre la soglia di benessere fissata dal OMS è di 50 al di sotto della quale ne si può percepire la mancanza, molti di più sono quelli consumati nei paesi industrializzati a fini domestici, ammontano a circa 600 litri consumati da un americano al giorno, un italiano ne consuma 200 mentre sono solo 10 i litri che un cittadino del Madagascar consuma in un giorno. Un ulteriore problema alla disponibilità di acqua è la qualità che spesso non essendo sufficiente a garantire l'assenza di batteri, causa ogni anno milioni di morti.

1.2 La Dissalazione dell'Acqua di Mare

La dissalazione dell'acqua di mare è un processo che avviene su larga scala in modo naturale: L'irraggiamento proveniente dal sole cede energia alle superfici oceaniche iniziando il processo di distillazione che termina con la condensazione alle basse temperature presenti ad alta quota. Si stima che l'energia solare produca a latitudini medie circa 5 l/giorno di evaporato per m^2 di oceano. La dissalazione evaporativa industriale, sviluppatasi nel secolo scorso copia il processo naturale ma lo accelera e ne massimizza i flussi.

Cenni storici La moderna dissalazione nasce verso fine ottocento nel Regno Unito dalla necessità di garantire un'autonomia idrica prolungata a bordo delle navi della Marina Britannica. Questo fu possibile grazie alla diffusione dei motori a vapore e la disponibilità di energia a bordo assicurando grazie alla produzione di acqua potabile un notevole vantaggio strategico.

La dissalazione evaporativa per usi civili ha avuto inizio negli anni '50 spinta dalla ricchezza di paesi esportatori di petrolio con problemi di approvvigionamento idrico come Kuwait e altri paesi mediorientali. Dieci anni più tardi visto la possibilità di un promettente mercato anche in Italia (SIR - Società Italiana Resine), Germania (Krupp), Francia (Sidem) e negli USA (Westinghouse) nascono poli di progettazione e sviluppo delle tecnologie evaporative per la dissalazione. In Italia questo mercato è sopravvissuto passando da SIR a Italmimpianti e poi a Impregillo fino agli anni '80 sostenuto dai grandi investimenti industriali, infatti in passato le centrali ENEL e le grandi raffinerie erano spinte dagli enti governativi a rendersi indipendenti nel soddisfare i primari fabbisogni idrici mediante la costruzione di impianti di dissalazione per non sottrarre le risorse agli usi civili. Ad oggi i grandi impianti di dissalazione sono richiesti principalmente solo da paesi arabi dove il fabbisogno di acqua è sempre maggiore e la disponibilità di energia a basso costo abbondante [7].

Negli ultimi anni si è sviluppata un'altra tecnologia, l'osmosi inversa che sta prendendo sempre più piede nei mercati, spinta dalle innovazioni tecniche e dai costi minori delle mem-

brane. I primi impianti a scopo dimostrativo furono costruiti negli Stati Uniti nel 1959, ma la tecnologia fu penalizzata dai grandi consumi elettrici e dai costi elevati e dalla breve vita delle membrane. L'impulso all'applicazione di questa tecnologia è avvenuto negli anni '90 grazie al costo sempre minore delle membrane e l'invenzione dei sistemi di recupero hanno portato il consumo specifico da 10-12 kWh/m³ a 6-7 kWh/m³. Inoltre, a differenza degli impianti ad evaporazione, l'impiantistica dei sistemi ad osmosi inversa è molto più semplice e apre la strada anche a installazioni molto più piccole quindi più facili da installare e che non necessitano di manodopera specializzata. L'unico difetto importante è relativo alle membrane che hanno visto sì un crescente miglioramento tecnologico, ma tutt'ora permettono l'attraversamento al boro (*B*) che risulta tossico se ingerito in quantità superiore a 1 µg/l⁴.

1.2.1 L'acqua Salata Non è Tutta Uguale

L'acqua di mare contiene sali disciolti di natura differente, la cui quantità varia a secondo dei luoghi, delle stagioni e dell'attività antropologica circostante, si può però affermare che mediamente l'acqua di mare presenta le seguenti caratteristiche:

- pH compreso tra 7,6 e 8,4
- densità a 20°C di circa 1025 kg/m³
- conducibilità a 20°C compresa tra 48000 e 60000 µS/cm
- salinità TDS⁵ compresa tra 34000 e 45000 ppm
- aria disciolta compresa tra 20 e 28 ppm

Conducibilità e salinità sono strettamente legate e spesso si usa la prima come indice di salinità in quanto misurabile più semplicemente, anche se questa varia molto con la temperatura. Il pH invece dipende dalla quantità di CO₂ disciolta.

Tra i precedenti, la salinità è il parametro più importante che caratterizza l'acqua perché ne quantifica la quantità totale di sali disciolti (tra cui cloruro di sodio, magnesio, solfati di calcio e bicarbonati). La salinità dell'acqua è esprimibile attraverso diverse unità di misura, la cui presenza si deve principalmente a fattori di evoluzione tecnica. Un'accuratezza maggiore si ha quantificandola in parti per milioni (ppm) ma sono diffuse anche altre unità come "grammi su kg" o percentuale di massa di sali su massa totale.

Tra i principali elementi disciolti il calcio (*C*), presente in forma ionica rappresenta un elemento piuttosto critico, perché sempre presente in grandi quantità e durante i processi di desalazione può concentrarsi fino a precipitare e in tal modo produrre incrostazioni. Il calcio in

⁴Limite per l'acqua potabile fissato dal DPR 236/88

⁵Total dissolved solids

presenza di ioni carbonato forma carbonato di calcio ($CaCO_3$), che poco solubile in acqua, tende a precipitare, mentre in presenza di ioni solfato produce solfato di calcio ($CaSO_4$) anch'esso poco solubile. Per evitare la formazione di questi composti si cerca di non concentrare la salamoia oltre il limite di precipitazione, in questo modo si salvaguarda il buon funzionamento dell'impianto.

La presenza del Boro nell'acqua necessita di particolare attenzione, in quanto ne condiziona la potabilità. Il WHO ha stabilito il limite per l'acqua potabile sotto le 0,5 ppm. La problematicità di questo elemento si presenta in modo maggiore negli impianti a osmosi inversa perché le particelle sufficientemente piccole da passare attraverso la membrana si concentrano nel permeato.

Il mare è un grande ricettore dell'anidride carbonica presente nell'aria infatti la CO_2 si scioglie particolarmente bene nell'acqua. La sua presenza è molto delicata in quanto ne governa l'equilibrio con i bicarbonati e può provocare problemi nel processo di osmosi inversa in quanto le sue molecole passando attraverso la membrana si concentrano nel permeato con conseguente aumento dell'acidità.

Altri elementi e composti a cui è necessario prestare attenzione sono oli e idrocarburi che possono creare inconvenienti come la generazione di schiume durante i processi termici o nell'osmosi inversa aderire alle membrane causandone l'occlusione. Infine la presenza di ammoniaca se supera determinate concentrazioni rappresenta una minaccia di corrosione chimica per rame e le sue leghe, largamente usati nei processi termici.

In letteratura, ma anche nella quotidianità si usa distinguere l'acqua in quattro tipi in funzione della quantità di sali disciolti:

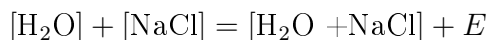
- Acqua Dolce < 450 ppm
- Acqua Salmastra 500 ÷ 30000 ppm
- Acqua Marina 30000 ÷ 50000 ppm
- Salamoia > 50000 ppm

Nell'elaborato, soprattutto nella sezione dedicata all'impianto di osmosi inversa spesso verranno utilizzati con lo stesso valore i termini salamoia, concentrato e rigettato, mentre per indicare l'acqua marina si usa spesso il termine acqua alimento.

1.2.2 Tecnologie e Principi Fisici

Il passaggio da un sistema ad una data entropia ad uno ad entropia minore comporta sempre una spesa di energia per "riordinare il sistema" la cui quantità teorica dipende solamente dallo stato iniziale e da quello finale che si vuole ottenere. Lo stesso vale se si vuole dissalare

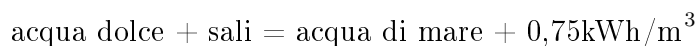
l'acqua, quindi per ridurre il disordine, ovvero togliere il sale dall'acqua è necessario spendere una certa quantità di energia:



dove E corrisponde a:

- calore di dissoluzione: calore che si sviluppa durante la dissoluzione di un sale in acqua
- pressione osmotica: differenza di pressione che si viene a creare quando una membrana osmotica è posta tra due soluzioni a differente concentrazione
- gradiente ebullioscopico: differenza di temperatura di evaporazione di una soluzione rispetto al solvente puro

L'energia primaria da fornire al sistema per dissalare non cambia in funzione della tecnologia, da ciò si può affermare che il processo di dissalazione è in ogni caso energeticamente dispendioso. L'energia minima necessaria per invertire il processo si può calcolare introducendo una quantità di sale in un metro cubo di acqua sufficiente a creare una soluzione equivalente a quella di mare e misurando l'incremento di temperatura dovuto alla reazione esotermica. La variazione è di circa 0,64 °C corrispondenti a 0,75kWh/m³. Esprimendo la reazione chimica in termini più semplici:



In realtà date le inefficienze dei vari sistemi ogni tecnologia ha bisogno di una quantità maggiore di energia. Negli impianti evaporativi l'energia è fornita sotto forma di calore, mentre in quelli ad osmosi inversa come energia di pressione. In ogni caso l'energia minima da fornire a parità di salinità e temperatura rimane la stessa indipendentemente dal processo in quanto il calore di dissoluzione dei sali, il gradiente ebullioscopico e l'energia potenziale della pressione osmotica si equivalgono in termini di energia.

Esiste però una differenza sostanziale tra i due principali processi di dissalazione: i processi evaporativi usano energia termica (vapore) proveniente da spillamenti di turbine per la produzione di energia elettrica, mentre in quelli ad osmosi inversa il funzionamento delle pompe è garantito dalla più pregiata energia elettrica. Tenendo in considerazione il rendimento elettrico in prima approssimazione si può affermare che impianti evaporativi necessitano di 1,9kWh_T/m³ di acqua dissalata, mentre quelli ad osmosi inversa abbisognano di 5kWh_T/m³. Un ulteriore precisazione va però fatta perché se si volesse dissalare con procedimento termico un metro cubo di acqua marina utilizzando vapore prodotto da una caldaia dedicata, il

consumo potrebbe risultare anche di oltre 60kWh_T. Per questi motivi le considerazioni sulla tecnologia più conveniente sono influenzate da molti fattori, così come dalle portate di acqua richieste.

1.2.2.1 Impianti Evaporativi

Fornendo energia all'acqua di mare, essa si riscalda fino alla temperatura di ebollizione corrispondente alla pressione a cui si trova. Riscaldando ulteriormente se ne provoca l'evaporazione. Il vapore in presenza di una sorgente a bassa temperatura può cedere calore e ricondensare quest'ultimo può essere recuperato utilizzandolo per preriscaldare l'acqua o generare nuovo vapore. Un processo di questo tipo funzionante in continuo è la base della dissalazione termica dell'acqua di mare.

Per assicurare processi efficienti, la fornitura di vapore di alimentazione proviene da impianti preesistenti, perciò si usa definire l'efficienza energetica tramite il coefficiente GOR (Gained Output Ratio) definito come il rapporto in massa tra l'acqua prodotta meno il vapore alimento e la massa di vapore necessario utilizzato per la dissalazione che sarà restituito all'impianto.

$$\text{GOR} = \frac{m_{H_2O} - m_{vap}}{m_{vap}}$$

Negli impianti evaporativi è necessario evitare l'aggravarsi dei rischi di corrosione e di incrostazione dovuti alle alte temperature, si limita quindi la temperatura che l'acqua di mare può raggiungere. Questo massimo viene valutato in base alla gravità delle conseguenze e alla possibilità di porvi rimedio, ciò dipende dal lato dello scambiatore in cui avviene l'evaporazione: negli impianti multi-flash dove l'evaporazione avviene all'interno dei tubi, quindi più facili da pulire, il limite di temperatura è assunto a 113°C mentre in quelli a multiplo effetto in cui l'evaporazione avviene lato mantello il limite è fissato a 65-70°C. Per disporre di un intervallo di funzionamento sufficientemente ampio è necessario non potendo aumentare la massima, diminuire la temperatura minima di esercizio. Per permettere l'ebollizione a temperature così basse si opera quindi sottovuoto. Il limite di temperatura inferiore è dato dal mezzo refrigerante, ovvero l'acqua di mare. Nei successivi paragrafi così come si usa nel gergo ingegneristico il termine ebollizione viene sostituito dal termine *flash* in caso di passaggi di fase rapidi mente nel caso di processi lenti dal termine *evaporazione* [7, 8].

1.2.2.2 Tecnologie a flash

Il flash è il fenomeno di immediata e violenta vaporizzazione dell'acqua quando subisce un espansione che la porta in un ambiente a pressione inferiore a quella di ebollizione alla temperatura a cui si trova. Nel passaggio da un ambiente all'altro ogni particella di acqua esplose

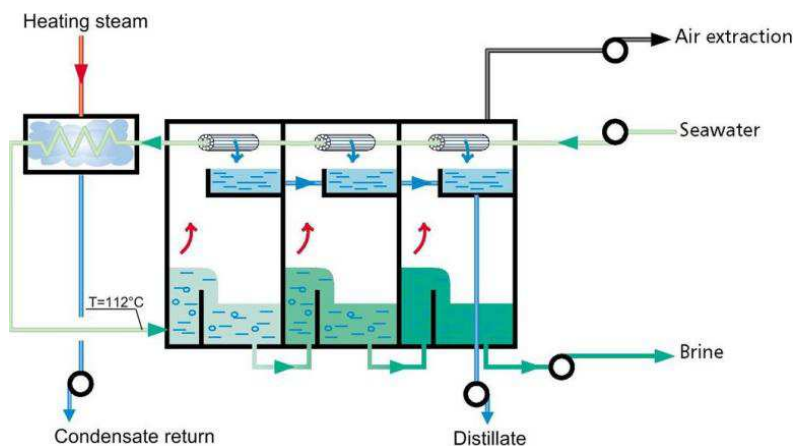


Figura 1.3: Schema dissalatore a flash multiplo - MSF

rilasciando tanto vapore quanto è necessario ad abbassare la temperatura fino al punto di equilibrio con la pressione. A causa della grande differenza di densità tra acqua e vapore a pressioni minori di quelle atmosferica la portata volumetrica del vapore può aumentare fino a cento volte quella dell'acqua; questo violento aumento di volume rende indispensabile progettare adeguate geometrie della camera al fine di governare al meglio il processo.

Come illustrato nella figura 1.3 l'acqua di mare percorre preriscaldandosi il lato tubi dei condensatori in serie dal condensatore a temperatura più bassa a quello a temperatura più alta. Successivamente viene riscaldata ulteriormente in modo da generare vapore condensabile sul fascio tubiero al primo stadio di flash. Il calore da fornire all'acqua alimento è pari a al raffreddamento per flash in ogni stato più la differenza i temperatura assegnata alla condensazione in ogni stadio.

L'efficienza termica di un dissalatore multi-flash è quindi funzione del numero di stadi e dell'estensione della superficie di scambio in ogni stadio, cosa che influisce sul costo di fabbricazione. Dal punto di vista realizzativo sono state sviluppate diverse varianti impiantistiche allo scopo di migliorare l'efficienza o di ridurne il costo. Le varianti sono quattro e costituite combinano l'una o l'altra soluzione impiantistica possibile:

- ricircolazione di salamoia (con tubi trasversali o longitudinali)
- passaggio semplice di acqua (con tubi trasversali o longitudinali)

La prima soluzione rappresenta l'impianto classico utilizzato specialmente nelle taglie maggiori. La ricircolazione di salamoia non evaporata alla fine del processo viene miscelata all'acqua alimento in modo da recuperare parte del calore che altrimenti verrebbe perso. Naturalmente la ricircolazione della salamoia non può essere totale per mantenere tenori di salinità che

garantiscono il corretto funzionamento del flash e prevenire incrostazioni e corrosioni. La parte di salamoia eliminata prima raggiungere il mare cede, attraverso degli scambiatori, energia all'acqua alimento.

Nei sistemi multi-flash a passaggio semplice il processo risulta meno conveniente rispetto a quello precedente, ma presenta costi di installazione minori dovuti alla semplicità impiantistica. A causa della bassa efficienza questi impianti di dissalazione stanno via via scomparendo, sostituiti dai primi [7, 8].

1.2.2.3 Tecnologie a multiplo effetto

I dissalatori a multiplo effetto sono particolarmente convenienti per le loro condizioni di funzionamento e si stanno diffondendo rapidamente perché offrono gli stessi vantaggi di affidabilità e facilità di conduzione degli impianti MSF e ad un costo d'investimento minore. Inoltre grazie al sistema di trasformatori di vapore consentono lo sfruttamento di fonti termiche a bassa temperatura e quindi possono essere pensati come recuperatore di energia.

I trasformatori di vapore costituiscono l'unità base di un effetto del sistema MED. In questi scambiatori il calore condensante cede il calore all'acqua di mare che a contatto con l'altro lato della superficie di scambio evapora. In questo modo il vapore che condensa ad una determinata pressione può generare una quantità quasi uguale di vapore ad una pressione leggermente inferiore. La differenza di vapore prodotto è funzione del gradiente ebullioscopico, dalle perdite di carico e dalle eventuali inefficienze e dispersioni termiche.

Lo schema base del MED rappresentato in figura 1.4 è costituito da trasformatori collegati in serie disposti in modo che ognuno condensi il vapore generato nello stadio precedente e generi il vapore per quello successivo. La temperatura massima deve essere mantenuta al di sotto dei 70°C al fine di evitare incrostazioni delle superfici evaporanti, mentre la minima determina l'ultima condensazione e quindi è funzione della temperatura dell'acqua di mare. Il numero di effetti è funzione della temperatura minima essendo la massima fissata per questioni tecnologiche inoltre per ciascun stadio si può sfruttare un salto di temperatura di soli 3°C (di cui 2°C utili e uno dovuto alle perdite), quindi con un ΔT di 30°C si possono realizzare fino a 10 stadi in serie.

L'energia da fornire all'impianto serve per portare alla temperatura massima l'acqua alimento in quanto solo parzialmente preriscaldata nella condensazione finale e nel caso a supplire alle perdite di energia tra uno stadio e l'altro.

MED con termocompressore Spesso il processo è alimentato con vapore spillato a 5bar in modo da installare tubi più piccoli per il suo trasporto. In questi casi invece di laminare il vapore fino a 320mbar (pressione di saturazione del vapore a 70°C) è preferibile installare un termocompressore che ricircolando il vapore dall'ultimo stadio aumenti l'efficienza energetica

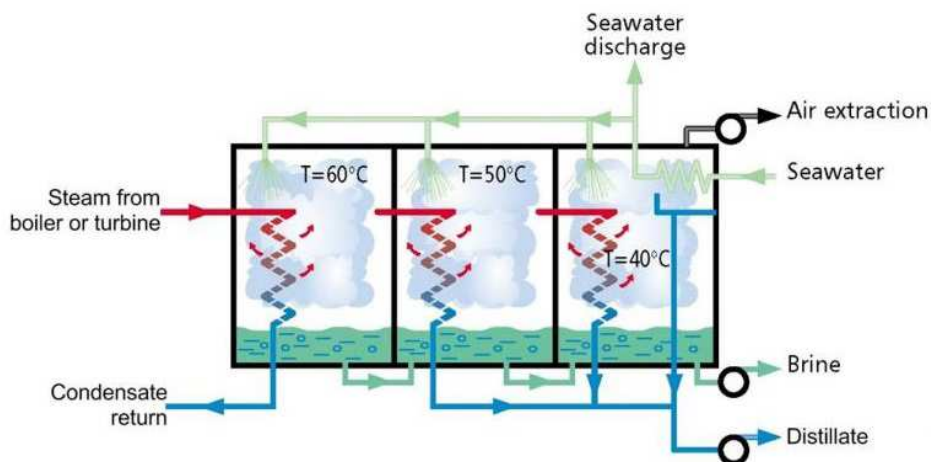


Figura 1.4: Schema dissalatore a multiplo effetto - MED

totale fino a raddoppiarla. Il vantaggio è notevole, poiché al primo effetto può essere fornita una quantità circa doppia del vapore primario, con il risultato che ogni effetto produce circa il doppio del vapore di alimento. Quindi a parità di effetti produce circa il doppio di acqua oppure a parità di produzione si può ridurre il numero di effetti riducendo drasticamente i costi di investimento. Naturalmente il valore del vapore a 5 bar non è lo stesso di quello all'uscita dell'ultima turbina che veniva utilizzato nel sistema senza termocompressore, quindi un'analisi economica per valutare ogni volta la configurazione migliore è d'obbligo.

1.2.2.4 Osmosi Inversa

Le molecole di acqua per loro natura si comportano come bipoli, ovvero presentano una parte elettricamente positiva e una negativa. In presenza di uno ione elettricamente attivo (positivo o negativo) le molecole vengono attratte formando un agglomerato stabile di molecole di dimensioni proporzionali alla forza elettrostatica dello ione.

Esistono membrane che sfruttano la differenza di grandezza tra agglomerati e molecole per filtrare d'acqua. Le membrane dette di nano-filtrazione impediscono il passaggio ai soli ioni bivalenti (con carica doppia), mentre quelle osmotiche anche agli ioni monovalenti come sodio e cloro e per questo vengono usate nella filtrazione di acqua di mare.

L'osmosi è il fenomeno di diffusione di molecole di acqua che si verifica quando una membrana osmotica è interposta tra due soluzioni a salinità differente. A cavallo della membrana si instaura una pressione proporzionale al gradiente di concentrazione che spinge l'acqua dalla soluzione povera di soluto a quella più ricca. Questa pressione risponde alla necessità del sistema di portarsi in equilibrio, ovvero uguagliare la salinità delle due soluzioni. Il flusso osmo-

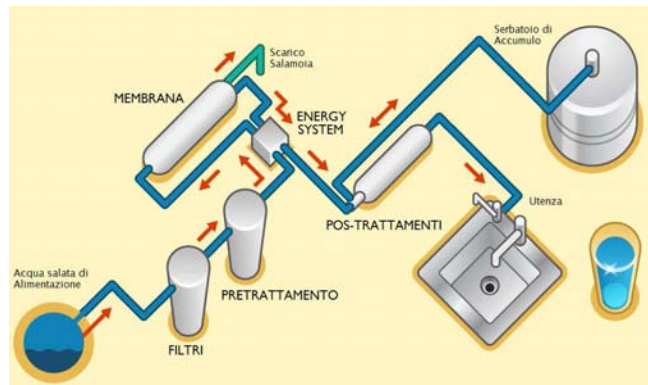


Figura 1.5: Schema impianto a Osmosi Inversa

tico può essere interrotto applicando alla soluzione più concentrata una pressione pari a quella osmotica, se la pressione aumenta ulteriormente il flusso si inverte ottenendo così il processo di osmosi inversa.

La pressione e quindi l'energia da fornire per invertire il processo dipende dalla differenza di concentrazione; per l'acqua di mare è di circa 26-30 bar. Il processo come tutte le trasformazioni reali presenta delle dissipazioni di energia dovute alle perdite di carico a cavallo della membrana, alla temperatura di funzionamento e alla concentrazione della salamoia, quindi normalmente si opera a pressioni di 65-70 bar.

Il processo comporta costi elevati per la compressione dell'acqua, per far sì che solo parte di essa (30-40%) venga dissalata. La salamoia rigettata dalla membrana contiene ancora molta energia di pressione che viene recuperata attraverso appositi sistemi (turbo-pompe o scambiatori di pressione) sviluppati recentemente che hanno permesso una diffusione via via maggiore di questa tecnologia per la dissalazione. Gli impianti ad osmosi inversa sono formati come mostra la figura 1.5 da cinque componenti principali: pretrattamento, pompa ad alta pressione, membrana, recuperatore di energia e post trattamenti [9].

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

- Eliminare la componente biologica per proteggere le membrane da proliferazioni batteriche. Il sistema più utilizzato è l'iniezione di cloro, oppure attraverso trattamenti a raggi UV.

- Chiarificazione o filtrazione preliminare, ovvero una microfiltrazione per eliminare particelle solide sospese.
- Disoleazione. La presenza di oli e idrocarburi è dannosa per la membrana quindi devono essere rimossi con l'utilizzo di carboni attivi o la flottazione con aria.
- Filtrazione meccanica attraverso filtri a sabbia
- Declorazione. Le membrane non apprezzano la presenza di cloro che l'acqua contiene dal pretrattamento necessario subito in precedenza, è quindi necessario provvedere alla rimozione del cloro attraverso il dosaggio di elementi fortemente riducenti. La presenza della filtrazione a carboni attivi può sostituire questo trattamento.
- Correzione del pH che varia con la presenza di CO_2 dosando acido solforico e sfiatando la CO_2 .

Pompa alta pressione La pressione osmotica è funzione della salinità, quindi la pressione che la pompa deve fornire deve essere sufficiente a superare (quasi del doppio) la pressione da vincere. La pompa è la macchina che permette il processo di osmosi inversa fornendo all'acqua l'energia necessaria al processo. Queste macchine devono fornire un'elevata pressione (di circa 60-70bar) e portate relativamente basse per questo si usano o pompe centrifughe multistadio oppure pompe volumetriche a pistoncini assiali che assicurano un flusso abbastanza costante.

Membrane La membrana è la superficie attraverso cui permea l'acqua. La sua qualità è di estrema importanza in quanto le sue caratteristiche si ripercuotono sull'intero processo.

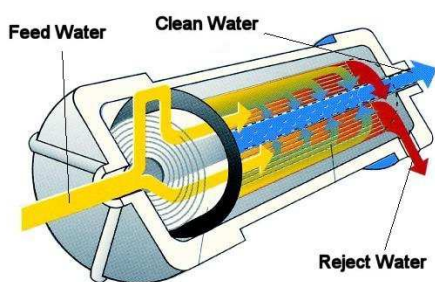


Figura 1.6: Membrana a spirale avvolta

La permeabilità delle membrane è solitamente bassa perciò sono necessarie superfici estese e al fine di ridurre le dimensioni in volume si usano varie tecnologie di costruzione, tra cui le più comuni sono a spirale avvolta (in figura) e a fibra cava. Le prime anche se di complessità costruttiva maggiore si stanno largamente affermando perché presentano notevoli vantaggi in termini di resistenza al fouling (sporciamento) e di facilità di pulizia.

I materiali utilizzati alla costruzione di queste membrane sono l'acetato di cellulosa (CA) e il poliammide (PA). Altri materiali trovano applicazione in casi specifici diversi dalla dissalazione dell'acqua di mare. Spesso si usa

installare membrane CA nel primo passaggio per avere il vantaggio della maggior resistenza chimica e membrane PA nel secondo per assicurare una maggior purezza del permeato.

Le membrane costituiscono circa il 30% dell'investimento totale quindi bisogna assicurare attraverso una buona scelta e progettazione, il corretto funzionamento ed evitare le possibilità di incrostazione attraverso lavaggi chimici e trattamenti di sanitarizzazione [9].

Ricuperatore di Energia Grazie a dispositivi di recente invenzione per recuperare l'energia, il consumo specifico di questi impianti è diminuito molto. Nel processo di osmosi inversa parte dell'acqua pressurizzata contro la membrana permea, mentre la restante è rigettata ad una pressione che è circa quella di ingresso della membrana. Fino a metà del decennio scorso l'energia contenuta nella frazione espulsa (ad alta concentrazione salina) era recuperata attraverso turbine Pelton accoppiate a pompe che prepressurizzavano o contribuivano a pressurizzare parte dell'acqua alimento in ingresso alla membrana con rendimenti del 60-70%. Da qualche anno sono disponibili sul mercato dei sistemi di recupero chiamati *pressure exchanger* (scambiatori di pressione) [17].

Questa recente tecnologia consente di scambiare energia da un fluido ad alta pressione, in questo caso la salamoia, ad uno a bassa pressione, l'acqua marina di alimento. Un particolare tipo di scambiatore di pressione è il *rotary pressure exchanger*, in questo dispositivo (illustrato in figura 1.7) un albero permette il movimento di un rotore cilindrico al cui interno sono presenti dei vani longitudinali, alle estremità due teste collettano entrate e uscite. L'energia di pressione è trasferita direttamente da un fluido all'altro attraverso i canali del rotore, si parla in questo caso di pistone fluido la cui interfaccia grazie alla velocità di rotazione è ben definita e il mescolamento tra i due fluidi è pressoché trascurabile. Durante il funzionamento il fluido da pressurizzare entra in un canale espellendo il fluido che ha ceduto la sua energia nel ciclo precedente, il rotore si porta nella posizione in cui il cilindro fluido da pressurizzare entra in contatto, da un lato con la salamoia ad alta pressione che cede la sua energia all'acqua alimento e viene espulsa, e dal lato opposto con una pressione circa uguale a quella rigettata dalla membrana. L'efficienza di questo dispositivo è notevole e si aggira attorno al 98% [10]. L'installazione di questo dispositivo oltre al recupero di energia permette di ridurre la potenza dell'impianto (o di aumentarne la produzione) e diminuendone le sollecitazioni di allungarne la vita utile [16]. Inoltre a differenza del sistema peloton-pompa, funziona in un range molto più ampio sia di pressioni che di portate, ed avendo solo il rotore in movimento invece



Figura 1.7: Rotary pressure exchanger

di accoppiamenti meccanici, risulta oltre che più efficiente anche maggiormente affidabile e durevole.

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

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

1.2.2.5 Tecnologie Recenti in Fase di Studio

In futuro la dissalazione si renderà purtroppo necessaria in maggior quantità, e probabilmente a causa della scarsa qualità dell'acqua sarà necessaria anche in posti che oggi sono idricamente autosufficienti. Sperimentazione e ricerca stanno mettendo a disposizione per il prossimo futuro nuove tecnologie che puntano ad un minor consumo di energia specifica.

Forward Osmosis Questa tecnologia, a breve disponibile sul mercato, sfrutta il processo di osmosi. Il fenomeno di osmosi in cui un solvente fluisce da una regione a bassa pressione osmotica attraversando una membrana semi permeabile verso una zona a pressione osmotica maggiore, in questo modo l'acqua da dissalare passa in modo naturale verso la membrana verso una soluzione ad alta concentrazione. Successivamente questa soluzione più concentrata rispetto al momento iniziale viene trasportata ad un separatore in cui attraverso un processo termico il soluto viene eliminato. Si estrae in questo modo acqua dolce, mentre il soluto viene reintrodotta nella miscela separata per cominciare nuovamente il processo. Questo sistema è energeticamente conveniente in quanto l'acqua attraversa in modo autonomo la membrana separandosi così dal sale marino, i modelli attuali risparmiano fino al 30% a parità di acqua dissalata dell'energia necessaria in un impianto a osmosi inversa. Gli altri principali vantaggi di questa tecnologia sono il minor sporcamento della membrana, un aumento della sua vita utile e quindi minori costi di operazione e l'assenza della pompa ad alta pressione che deve trattare acqua salata. Il primo impianto funzionante è stato installato nel Settembre 2008 a Gibilterra e l'anno successivo ha cominciato a fornire acqua potabile. Questa insieme alle successive è

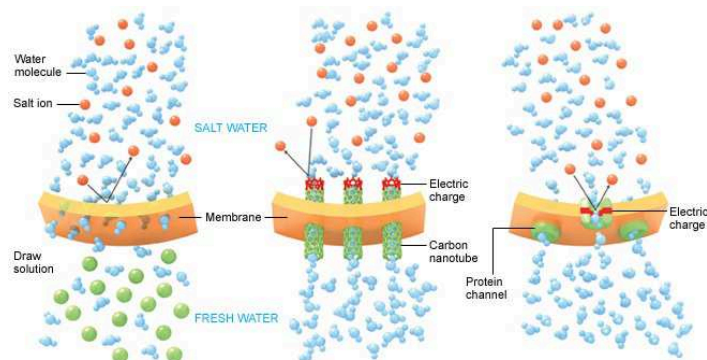


Figura 1.8: Tecnologie future per la dissalazione

una delle tre tecnologie per la dissalazione che ridurranno sensibilmente i consumi di energia e che quindi sono destinate a sostituire le tecnologie tradizionali [12].

Nanotubi di carbonio Lo sviluppo di membrane più efficienti sembra essere una delle possibilità per aumentare l'efficienza dei processi di dissalazione. Presso la Strathclyde University a Glasgow si stanno sperimentando nuove membrane con una struttura realizzata da nanotubi di carbonio che impediscono il passaggio dei sali e consentono il passaggio di poche molecole di acqua per volta ma con una permeabilità 20 volte superiore alle membrane tradizionali. Il processo è identico a quello dell'osmosi inversa ma queste membrane consentono un notevole risparmio di energia dovuta alla riduzione della pressione impressa [12].

Biomimetics Recentemente si stanno sperimentando nuove membrane organiche imitando i flussi attraverso le superfici delle cellule. Questo processo biologico avviene grazie alle Aquaporine, una famiglia di proteine che organizzandosi in micro tubi consentono il passaggio di acqua. L'obiettivo è costruire una membrana a cui applicare all'estremità a contatto con l'acqua da depurare una carica elettrica che eviterebbe il passaggio dei sali disciolti [12].

Capitolo 2

Struttura e Componenti del Sistema

Nella fase iniziale di progettazione, prima del dimensionamento dell'impianto di dissalazione si è pensato alle caratteristiche delle possibili realtà in cui il sistema avrebbe potuto inserirsi; partendo da uno studio sulle carenze idriche nelle zone geograficamente più vicino alla nostra si è individuato come vasto campo di installazione il bacino del Mediterraneo: isole e realtà costiere rurali o isolate.

Le isole del Mediterraneo sono caratterizzate da una bassa piovosità annuale di circa 600 mm. La stagione secca va generalmente da maggio a settembre è anche quella più calda. Le alte temperature aumentano l'evapotraspirazione che causa una riduzione delle risorse idriche che durante la stagione estiva subiscono lo stress maggiore a causa del maggior irrigamento e dell'aumento della domanda dovuta al turismo [13].

In alcune zone, in presenza di scarsità di risorse idriche è quindi necessario integrare la richiesta delle utenze fornendo acqua potabile prodotta dissalando la grande riserva di acqua salata disponibile in situ. Nel bacino del Mediterraneo sono molti i dissalatori per la fornitura di acqua potabile o per irrigazione. Spagna, Algeria, Malta, Israele e Creta sono i paesi che contano la maggior quantità di dissalatori [7].

Come ci si può aspettare l'ampia area d'applicazione considerata è caratterizzata da una grande risorsa energetica che mette a disposizione durante tutto l'anno una considerevole quantità di energia gratuita: il sole. È stato quindi scelto come fonte principale di produzione dell'energia un sistema a moduli fotovoltaici.

Il problema di una fonte rinnovabile come l'energia solare è la sua intermittenza che ne consente l'approvvigionamento soltanto durante le ore diurne. A fronte di questa caratteristica del sistema di produzione si è pensato l'installazione di un sistema di accumulo in grado di

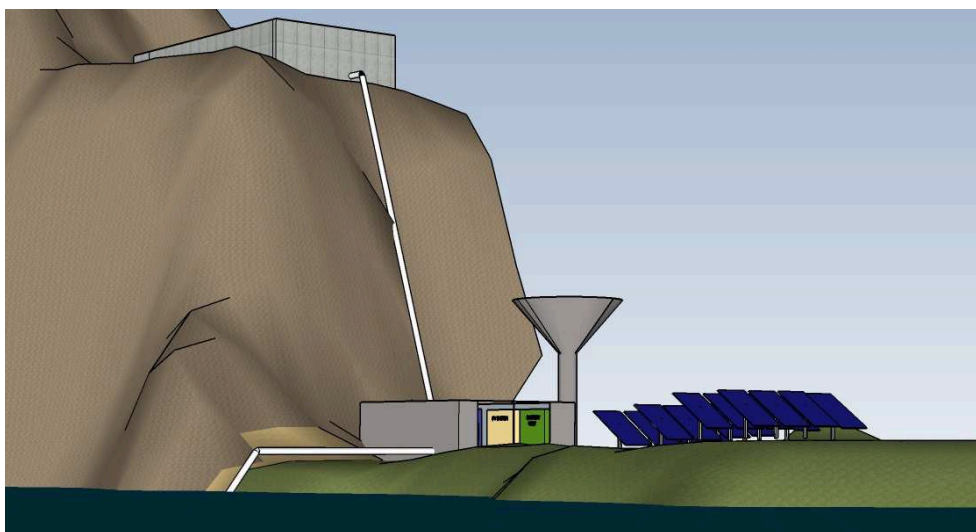


Figura 2.1: Immagine esemplificativa della struttura e del posizionamento dell'impianto

fornire elettricità alle utenze anche durante le ore serali e mattutine. Si inserisce in quest'ottica il terzo requisito indispensabile che motivi il sistema in oggetto: la presenza di una falesia o di un sito nelle vicinanze ad una quota notevolmente sopraelevata rispetto all'utenza idrico-elettrica. Questa caratteristica è necessaria all'istallazione del sistema di stoccaggio di energia attraverso il pompaggio dell'acqua aspirata direttamente dal mare, evitando così la costruzione del serbatoio di valle, verso un bacino posto a monte, cuore dell'accumulo energetico.

Il sistema è quindi formato da un impianto fotovoltaico che provvede all'alimentazione, un sistema a osmosi inversa per la dissalazione dell'acqua, l'impianto di pompaggio per l'accumulo e naturalmente le utenze domestiche che necessitano di acqua potabile ed energia elettrica.

Da quanto detto precedentemente emergono tre caratteristiche necessarie che giustificano la costruzione di un impianto di questo tipo: la disponibilità di acqua salata, l'elevato irraggiamento solare durante l'anno e la presenza di una falesia in prossimità del mare e dell'utenza. La figura 2.1 dà un'idea di come potrebbe essere costruito e posizionato l'impianto.

2.1 Gli Aspetti Caratterizzanti

Dopo avere definito le caratteristiche principali si è reso necessario valutare le tecnologie che meglio soddisfino le necessità e meglio si adattino alla realtà prescelta. I requisiti che il sistema e quindi i vari componenti devono possedere sono quelli caratteristici di sistemi installati in aree rurali ed economicamente meno sviluppate a cui però si vuole assicurare un livello minimo di benessere che in questo caso è rappresentato dalla fornitura necessaria di acqua ed energia

elettrica. Requisiti necessari sono: dimensioni contenute, economicità, semplicità impiantistica e quindi affidabilità.

Le dimensioni dell'impianto sono naturalmente proporzionali ai fabbisogni e alla quantità di utenze, data l'aleatorietà di questo parametro non esistendo un sito definito di installazione si è scelto di verificare attraverso alcuni parametri in seguito discussi, la soglia minima di utenze (sia come quantità di persone che di abitazioni) per cui l'impianto si giustifica. Come si vedrà in seguito la potenza minima è vincolata alle dimensioni delle pompe/PAT disponibili sul mercato. Ad ogni modo il lavoro si è focalizzato su una quantità di utenze non superiore a un centinaio di abitazioni, quindi circa cinquecento abitanti.

L'economicità è stata scelta come ulteriore parametro di valutazione per le scelte tra differenti tecnologie o configurazioni impiantistiche in quanto, in maggior modo nelle realtà rurali, è uno dei principali metri di valutazione.

Come ultimo aspetto legato però ai due precedenti vi è la semplicità impiantistica, che da un lato giustifica le piccole dimensioni, e dall'altro è proporzionale ai costi di investimento. Inoltre un impianto semplice è il requisito fondamentale in realtà rurali in cui operazioni di manutenzione dell'impianto o di interventi straordinari devono essere alla portata di tecnici residenti in loco.

2.2 Descrizione dell'Impianto e delle Tecnologie

Di seguito è introdotto il sistema isolato per di dissalazione e fornitura delle utenze elettriche, in modo da dare una breve introduzione alle caratteristiche dei sottosistemi e che in una fase preliminare del lavoro di tesi si è scelto siano importanti ai fini della buona progettazione.

2.2.1 La Fonte di Energia - L'impianto Fotovoltaico

Le carenze idriche a parte casi isolati sono elemento caratterizzante di climi caldi e desertici. Spesso queste zone presentano anche problemi di approvvigionamento energetico, per quanto riguarda le isole che difficilmente sono collegate alla rete elettrica nazionale l'energia deve essere trasportata in loco sotto forma di combustibile. Nell'ottica di ridurre le emissioni di anidride carbonica e altri inquinanti, o comunque di non incrementarle è stato deciso di alimentare l'impianto con un sistema fotovoltaico. La scelta è stata dettata anche dal fatto che spesso questi luoghi hanno un grande potenziale solare. Se prendiamo in considerazione il bacino del mediterraneo, le zone con scarsità idriche sono quelle più soleggiate, in cui l'energia solare annua disponibile è di circa 5000kWh/m^2 [14].

In prima analisi si è optato per una configurazione standard composta da moduli fotovoltaici e inverter, nella scelta analizzata successivamente il parametro di maggior importanza oltre al decadimento del rendimento nel tempo, è il costo dei moduli per kW installato.

2.2.2 La Dissalazione - L'Osmosi Inversa

Le tecnologie per la dissalazione come già visto sono molte. Nel caso in esame è richiesto un impianto che confrontato con la maggior parte degli impianti di dissalazione ha dimensioni piccole, nell'ordine delle decine di kW a cui corrispondono portate di acqua dissalata di una decina di m^3/h con un consumo che mediamente si aggira attorno ai 2,5kWh per m^3 di acqua prodotta. Per taglie così contenute sono disponibili principalmente impianti ad osmosi inversa; impianti ad evaporazione o a flash multiplo si giustificano solo per richieste di acqua molto maggiori (nell'ordine dei 100000 m^3 ora) in quanto i rendimenti crescono con la taglia [8].

L'osmosi inversa è quindi la tecnologia che in questo caso meglio si adatta alle esigenze e per questo è stata scelta per soddisfare la richiesta di acqua potabile. Un impianto di dissalazione a osmosi inversa è composto in ordine da una serie di pretrattamenti, da una pompa per l'acqua alimento che fornisce l'acqua al sistema vero e proprio: il congiunto pompa alta pressione - membrana - ricuperatore di energia ed infine da una serie di post trattamenti.

2.2.3 L'Accumulo Energetico

Quando si ha a che fare con le energie rinnovabili, l'aleatorietà del loro funzionamento necessita, in modo particolare nei sistemi isolati, di un accumulo energetico per consentire la continuità della fornitura dell'energia ed evitare momenti di blackout. Oggi giorno lo stoccaggio energetico è una delle questioni più discusse dal momento che, la penetrazione delle fonti di energia rinnovabile sta aumentando sensibilmente. Tra le svariate tecnologie disponibili ad oggi, le più semplici e mature sono indubbiamente l'accumulo idrico dell'energia e l'accumulo elettrochimico.

Lo stoccaggio di energia potenziale attraverso l'accumulo dell'acqua è una tecnologia molto consolidata. Il sistema è relativamente semplice anche se spesso le macchine utilizzate cambiano caso per caso, in funzione di portata e salto idraulico disponibile. Quando possibile sono preferibili macchine reversibili che fondono in un'unica macchina la possibilità di funzionare in modalità di pompa o di turbina, questa configurazione permette a fronte di un aumento della complessità un risparmio in termini economici, in quanto viene installata soltanto una macchina. In altri casi si preferisce in relazione alle caratteristiche idrauliche l'installazione di due macchine distinte: una pompa e una turbina [15, 19].

La grande disponibilità di acqua ha portato alla scelta dell'utilizzo di acqua marina (vedi fig 2.2). In una fase iniziale è stata valutata la possibilità di usare l'acqua dissalata per accumulare

energia, ma questa opzione è stata scartata in quanto molta più acqua di quella richiesta dalle utenze sarebbe dovuta essere dissalata con un aumento dell'energia richiesta e si sarebbero potuti verificare durante le fasi di accumulo, pompaggio e turbinaggio, episodi di contaminazione o variazione delle caratteristiche biochimiche dell'acqua. È sembrato più vantaggioso il ricorso all'acqua di mare, utilizzando come bacino inferiore il mare stesso. Ciò comporta una sensibile riduzione dei costi di investimento, in quanto è necessaria la costruzione del solo bacino di accumulo di monte [15].

Durante lo sviluppo del lavoro di tesi molto tempo è stato dedicato allo studio di questo sottosistema in quanto il suo corretto dimensionamento è fondamentale ad assicurare il funzionamento del sistema generale e la continuità della fornitura dell'energia elettrica. L'aspetto caratteristico dell'impianto di accumulo sono le di-

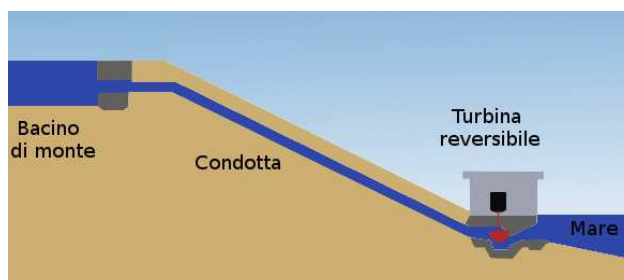


Figura 2.2: Schema impianto di pompaggio

dimensioni ridotte, infatti in letteratura non si riscontrano sistemi di pompaggio per energie di qualche centinaia di kWh, questo è dovuto anche all'assenza di macchine idrauliche nello specifico turbine reversibili che operino con buona efficienza per potenze di qualche kW. Per questo motivo e per questioni economiche sono state scelte come macchine reversibili delle semplici pompe che a scapito di qualche punto percentuale di rendimento rispetto a vere turbine possono operare con alcuni accorgimenti anche come macchine idrauliche reversibili (PAT - Pump used as Turbine). Usare la PAT è una scelta oltre che di semplicità impiantistica anche economica: le pompe centrifughe si trovano con facilità in buona parte del mondo, inoltre sono costruite in dimensioni molto varie adattandosi bene in funzione delle caratteristiche di portata e prevalenza necessaria che possono cambiare in relazione alla realtà in cui si decide la costruzione[18].

In prima approssimazione, come ci si può aspettare, l'impianto di pompaggio composto da PAT generatore/motore e inverter funziona in modalità di accumulo (pompando acqua al serbatoio in quota) durante le ore diurne, mentre al calar del sole e durante le ore notturne supplisce alla richiesta di carico turbinando l'acqua accumulata.

2.2.4 La Batteria di accumulatori elettrochimici

Data la natura isolata del sistema, questo deve assicurare in qualsiasi momento la fornitura di energia elettrica, in altre parole in ogni istante deve verificarsi l'equilibrio tra produzione, accu-

mulo e richiesta elettrica. Come già detto durante le ore diurne in presenza di irraggiamento solare questo equilibrio è sempre soddisfatto in quanto l'energia non consumata dalle utenze viene accumulata attraverso il sistema di pompaggio. Durante le ore notturne o di basso irraggiamento solare, se il carico è maggiore della potenza messa a disposizione dal sistema fotovoltaico entra in funzione la PAT che turbinando l'acqua genera l'energia necessaria. La PAT grazie all'inverter riesce ad assicurare un buon inseguimento del carico in modo da non dissipare l'energia che si avrebbe in surplus in caso di funzionamento a giri fissi. Il suo problema principale è l'intervallo di funzionamento, in quanto al di sopra ma soprattutto al di sotto una certa potenza non riesce ad operare.

Durante la fase di progettazione è stata presa in considerazione la possibilità per operare a tutti i livelli di potenza possibili e quindi sprecare la minor quantità di energia accostando un sistema di accumulo elettrochimico. Come si vedrà in seguito questo sistema dovrebbe operare per compensare i surplus e deficit di energia che il sistema di accumulo non può gestire. Le possibili modalità di funzionamento sono molteplici e analizzate successivamente, ma tutte puntano al minor uso possibile di questo apparato in modo da installare piccole taglie e garantendo così economicità e durata delle batterie.

2.2.5 Utenze

Le modalità per soddisfare l'utenza elettrica ed idrica delle abitazioni differiscono in modo sostanziale. La fornitura di acqua alle case è pressoché autonoma, infatti l'acqua dopo esser dissalata viene pompata ad un bacino leggermente in quota in modo da assicurare la pressione necessaria all'impianto domestico. L'acqua fluisce in modo autonomo dal bacino alle utenze senza la necessità di installare altri dispositivi. Naturalmente è necessario che la quantità di acqua dissalata durante le ore diurne (in presenza di energia solare) sia sufficiente ad assicurare il fabbisogno delle ore seguenti (sera e mattina successiva) in cui l'impianto di dissalazione è spento.

Un funzionamento più complicato, ma anch'esso autonomo grazie ad un'unità logica, è previsto come si vedrà per la fornitura dell'utenza elettrica alle abitazioni.

Per ogni abitazione si è stabilito, a partire da fonti bibliografiche, un fabbisogno minimo standard per abitazione sia di energia elettrica sia di acqua potabile sufficienti ad assicurare una vita dignitosa alla popolazione locale.

2.2.6 Schema Impiantistico

L'interconnessione dei vari sottosistemi su cui si basa il funzionamento generale del sistema è resa più chiara dalla figura 2.3. Nel capitolo successivo ogni blocco sarà analizzato nel

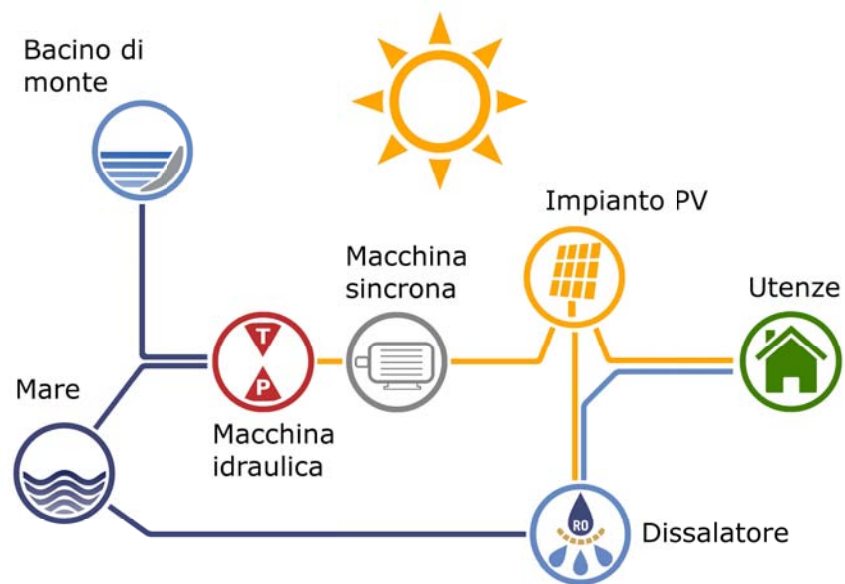


Figura 2.3: Schema di interconnessione dei sottosistemi

dettaglio e dimensionato tenendo in considerazione l'effetto che il singolo ha sul resto del sistema in modo da trovare la configurazione migliore che assicuri semplicità ed economicità.

Capitolo 3

Dimensionamento e Analisi del Sistema

Il lavoro principale affrontato durante il periodo di tesi è stato lo studio delle possibili scelte impiantistiche e il dimensionamento dei sottosistemi con particolare attenzione a quello per lo stoccaggio e la produzione dell'energia che rappresenta per sua natura il fulcro centrale, e di cui si è cercata la soluzione impiantistica migliore valutando anche configurazioni ibride in cui si sfruttano in modo sinergico le caratteristiche positive dei diversi sistemi di accumulo.

Nel processo di dimensionamento come prima operazione viene calcolata la superficie dell'impianto fotovoltaico necessaria a garantire lo stoccaggio di una quantità sufficiente da fornire durante le ore notturne. Dato che ogni conversione di energia presenta delle inefficienze si può calcolare un rendimento generale di accumulo che tiene conto sia della conversione di accumulato sia quella di rilascio dell'energia. Al diminuire di questo rendimento per mantenere costante la quantità di energia finale si deve aumentare la quantità di energia immagazzinata, quella prodotta dal sistema fotovoltaico e quindi aumentare il numero di moduli. La superficie di moduli fotovoltaici è quindi inversamente proporzionale all'efficienza globale del sistema di accumulo. Un aumento dell'efficienza provoca da un lato un aumento del costo dell'impianto dall'alto permette una riduzione delle dimensioni, un ragionamento equivalente ma contrario si può fare al diminuire dell'efficienza che consente un'economicità maggiore. Si nota subito come la combinazione ideale non sia un problema immediata risoluzione.

Inoltre a parità di fabbisogni ogni scelta impiantistica presenta un proprio rendimento che influisce sulle dimensioni del bacino di stoccaggio dell'acqua marina, e quando presente, quelle della batteria; questi sono altri due parametri che opportunamente elaborati aiutano alla scelta della soluzione impiantistica migliore. Successivamente per un miglior confronto delle combinazioni e al fine di garantire sempre la buona gestione dell'impianto vengono utilizzati

varie logiche di interazione tra batterie e PAT le quali cercano un compromesso per consentire alle macchine un funzionamento il più possibile in prossimità del punto ottimale.

Per ogni sistema al fine di poter comparare ogni alternativa viene scelta la superficie di moduli fotovoltaici affinché la quantità di energia contenuta a fine giornata nei sistemi di accumulo sia uguale alla quantità iniziale. Viene calcolato in questo modo il rendimento globale del sistema di accumulo per quel dato funzionamento.

Nella fase successiva le varie ipotesi costruttive vengono comparate utilizzando i parametri calcolati nel dimensionamento, i tipi e le taglie delle macchine e tutti i dispositivi necessari al loro funzionamento. Come ultimo criterio di decisione viene effettuata un'analisi economica delle varie soluzioni.

3.1 Metodo

Dopo una prima discussione sulle possibili scelte e configurazioni impiantistiche sono emersi subito due fattori critici a cui si è deciso di prestare maggiore attenzione. In primo luogo la gestione di piccole reti isolate è molto complessa in quanto anche una piccola variazione di potenza viene percepita in termini relativi in modo molto maggiore rispetto ad una rete interconnessa. Per questo motivo è necessaria una regolazione dei carichi molto accurata che garantisca e mantenga il delicato equilibrio tra energia prodotta e consumata. In quest'ottica si è scelto di analizzare una giornata tipo suddividendola in porzioni di piccola durata per valutare istante per istante l'andamento dei carichi; semplificando molto rispetto alla realtà ma cercando di avvicinarsi si è optato per intervalli della durata di dieci minuti in cui i flussi di potenza si mantengono costanti.

Il secondo aspetto delicato che si è manifestato durante le prime settimane di lavoro è rappresentato dal sistema di accumulo dell'energia, per questo ci si è concentrati maggiormente su questo sottosistema in quanto responsabile della gestione dei flussi di energia. La disponibilità di acqua marina e la presenza di opere di presa già necessarie per il processo di dissalazione hanno indirizzato le scelte verso un accumulo idrico dell'energia, a cui si è aggiunta successivamente la presenza di batterie di cui si è verificata l'utilità.

Il carattere molto variabile dei carichi e la necessità di verificare in modo accurato i flussi di potenza ha portato alla scelta di utilizzare il software MATLAB per il dimensionamento e la verifica dell'impianto di accumulo prendendo in considerazione solo i flussi di potenza e la quantità di energia immagazzinata, mentre per la parte tecno-economica viene utilizzato un foglio di calcolo.

3.2 Fabbisogno Idrico

Sia i consumi di acqua sia di energia elettrica sono stati calcolati tenendo in considerazione l'area geografica e l'utenza da soddisfare. In aree rurali e di scarsità di acqua ci si può aspettare a differenza del mondo occidentale un utilizzo parsimonioso delle risorse idriche, perciò prendendo come estremi il consumo medio italiano di circa 200 litri giornalieri pro capite e quello minimo di 50 consigliato dall'OMS si è scelto un valore intermedio. Considerando una media di cinque persone per abitazione e sovrastimando leggermente i consumi per dar la possibilità di utilizzare acqua anche per irrigare un piccolo orto casalingo si è individuato un fabbisogno medio giornaliero per abitazione pari a 700 litri. Questa quantità di acqua se utilizzata in modo corretto e senza sprechi è più che sufficiente ad assicurare un ottimo livello di benessere.

Produzione e consumi di acqua possono non avvenire nello stesso momento perciò tra il dissalatore e l'utenza si interpone un bacino di accumulo posto leggermente in quota di modo che l'acqua raggiunga le utenze autonomamente sotto l'effetto della gravità. In questo modo il funzionamento del dissalatore può ridursi al solo periodo di forte irraggiamento solare producendo in quelle ore la quantità necessaria ai bisogni del villaggio fino al giorno successivo.

L'impianto ad osmosi inversa ha bisogno, per funzionare, di energia elettrica, ciò traduce il fabbisogno di acqua potabile in un fabbisogno di energia. Un impianto di piccole dimensioni con recupero di energia consuma circa 3 kWh per metro cubo di acqua dissalata. Nel caso analizzato, in cui si ipotizza l'installazione in un villaggio di una cinquantina di abitazioni, l'energia elettrica necessaria alla dissalazione di 35m^3 di acqua è pari a 105kWh.

3.3 Dissalazione ad Osmosi Inversa

La possibilità di accumulo evita che l'acqua potabile debba essere prodotta nel momento in cui è consumata, ciò rende più elastico il funzionamento dell'impianto di dissalazione e quindi conviene che funzioni solo in presenza di irraggiamento solare. Il compito di quest'impianto è di produrre la quantità necessaria di acqua per le 24 ore successive. Questo è possibile solo se la potenza dell'impianto ad osmosi inversa è sufficiente a dissalare, durante le ore diurne, tutta l'acqua necessaria a soddisfare il fabbisogno giornaliero.

Per assicurare il buon funzionamento del dissalatore si è scelto di farlo operare a potenza costante, quindi si è calcolata la potenza necessaria per produrre l'acqua necessaria nell'intervallo stabilito. Dal grafico dell'irraggiamento si può osservare che dalle 8:00 alle 16:00 la potenza si mantiene al di sopra del 50% della potenza massima, si è quindi scelto questo intervallo per il funzionamento dell'impianto. Imposto il tempo e nota l'energia necessaria dato il funzionamento a carico costante si calcola la potenza nominale.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{105kWh}{8h} = 13kW$$

Contattando varie aziende è stato individuato un dissalatore con una portata di $5m^3/h$ con un'efficienza di poco inferiore, quindi il fabbisogno di energia elettrica è leggermente superiore a quella stimata precedentemente, ma sostanzialmente non cambia la modalità di operazione.

3.4 Fabbisogno Elettrico

Come nel sistema di dissalazione anche per quanto riguarda l'energia elettrica si sfruttano le ore diurne per immagazzinare l'energia che verrà distribuita durante la notte. A differenza però dell'utenza idrica in cui produzione e consumo possono essere sfasati temporalmente, il carico elettrico richiesto dalle utenze continua a variare imponendo alle macchine di produrre istante per istante l'energia necessaria. Per simulare questo andamento variabile sono state utilizzate delle curve di carico elaborate in un progetto chiamato "Micene" effettuato dal Politecnico di Milano in cui sono stati misurati i consumi elettrici degli elettrodomestici di circa 110 abitazioni nel nord Italia al fine di avere uno strumento da utilizzare in programmi di gestione della domanda di energia elettrica [20].

Sul sito di questo progetto sono disponibili divisi per elettrodomestico le curve di carico medie, dalle cui si è costruito l'andamento della curva di carico media per abitazione. Tenendo in considerazione, come fatto per il fabbisogno di acqua, la natura rurale del villaggio sono stati considerati solo gli elettrodomestici più essenziali e dato che le misure effettuate nel progetto Micene si riferiscono ad una zona molto industrializzata è stato applicato un fattore di riduzione dei consumi di energia elettrica pari a 0,6. Le curve di carico si basano su misure effettuate ogni dieci minuti i cui valori di potenza sono tabellati per elettrodomestico in fogli di calcolo disponibili sul sito del progetto. Per aver dati coerenti si è mantenuto per il presente progetto la stessa frequenza di campionamento. Alla costruzione della curva media giornaliera concorrono frigorifero, televisione, personal computer, i dispositivi di illuminazione e lo scaldabagno elettrico. La curva generata sommando in ogni intervallo le potenze degli elettrodomestici è mostrata in figura 3.1. Va detto che, oltre alla selezione degli elettrodomestici e all'applicazione di un fattore di riduzione generale si è applicato per i consumi dello scaldabagno un ulteriore fattore che tiene in considerazione il minor uso di acqua calda in aree con temperature medie maggiori rispetto al nord Italia.

Come si può osservare nella curva del carico elettrico vi sono due picchi di richiesta in corrispondenza delle prime ore della mattina e in verso le prime ore della sera, i valori di potenza così bassa si devono al fatto che nel progetto "Micene" la curva è stata creata a partire da un

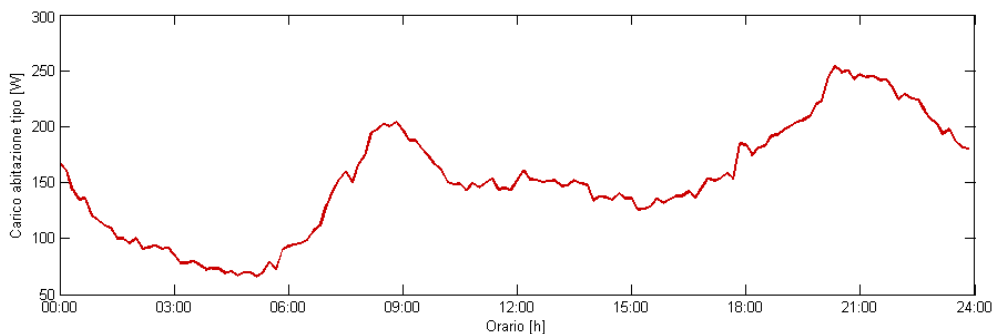


Figura 3.1: Curva di carico di un abitazione tipo

gruppo di abitazioni sommando istante per istante la richiesta di energia e dividendola successivamente per il numero di abitazioni considerate nel progetto. Con questo si vuol mettere in evidenza che più le abitazioni sono numerose più una curva di questo genere si avvicina alla realtà. Moltiplicando la curva di una singola abitazione per 50 che è il numero di abitazioni si può affermare che questa possa interpretare in modo abbastanza fedele la richiesta di energia elettrica. Per mantenere una semplicità di progettazione i consumi di energia elettrica rimangono costanti durante l'anno.

L'energia totale da fornire alla rete elettrica del villaggio è pari all'integrale sulle ventiquattro ore della curva di potenza

$$\int_0^{24} P_u(t) dt = 182kWh$$

quindi circa 3,64kWh per ogni abitazione.

3.5 Sistema Fotovoltaico

La dimensione dell'impianto fotovoltaico oltre a essere funzione dei carichi idrici ed elettrici dipende dalla posizione geografica, dai rendimenti di trasformazione e da quelli di stoccaggio. In particolare, l'immagazzinamento sia di acqua che di energia deve essere effettuato durante le ore diurne, quindi l'energia fornita dal sistema fotovoltaico deve essere sufficiente ad alimentare il processo di dissalazione, fornire energia alla rete e stoccare l'energia per la notte. Il rendimento di quest'ultima operazione si ripercuote inevitabilmente sulla quantità di energia da produrre e quindi sulla dimensione dell'impianto fotovoltaico. Peggiora l'efficienza del sistema di accumulo maggiore deve essere la quantità di moduli fotovoltaici e il numero di inverter con

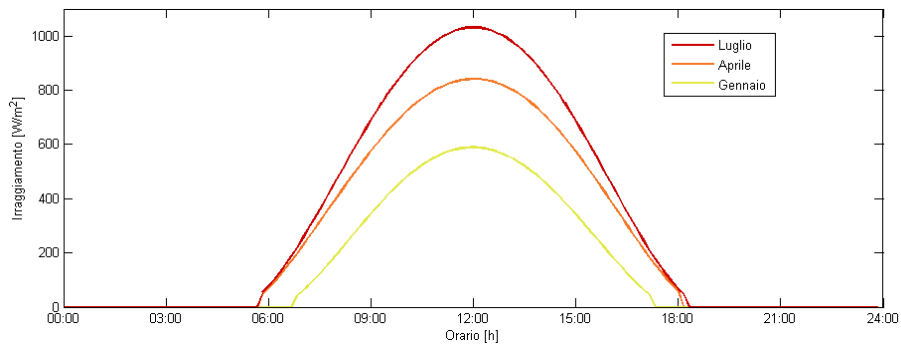


Figura 3.2: Irraggiamento diario medio mensile di Gennaio, Aprile e Luglio

un incremento del costo dell'impianto anche se non è detto che la soluzione migliore sia quella ad efficienza maggiore perché anche un aumento dell'efficienza provoca un aumento dei costi.

I dati di irraggiamento provengono dall'atlante solare PVGIS del JRC. In questo database sono disponibili i valori di potenza istantanei di irraggiamento medio mensile con i quali si può costruire la curva della potenza solare in W/m^2 . L'energia fornita dal sole durante l'anno varia molto con le stagioni, in prima approssimazione l'energia disponibile a Gennaio è circa la metà di quella disponibile a Luglio. Per un dimensionamento intermedio si è scelto il mese di Aprile, ciò provoca durante la stagione estiva una sovrapproduzione di energia che può essere utilizzata per dissalare una quantità maggiore di acqua sempre necessaria durante la stagione calda anche a fini agricoli. Mentre il sotto dimensionamento per la stagione invernale può essere compensato riducendo la quantità di acqua dissalata che in inverno è meno necessaria e inoltre le precipitazioni sono più probabili.

Nell'immagine 3.2 si può osservare la potenza solare (P_{sun}) che colpisce una superficie inclinata a 30° esposta a Sud in un giorno tipo del mese di Gennaio, Aprile e Luglio. I dati si riferiscono a Kasos, un'isola situata nell'Egeo meridionale. Partendo da questa curva si calcola attraverso il rendimento di conversione del pannello fotovoltaico ($\eta_{PV} = 0.18$) l'energia elettrica producibile durante una giornata:

$$\dot{E}_{PV} = \eta_{PV} \int_0^{24} P_{sun}(t) dt = 1,14 \quad [\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}]$$

Per calcolare il numero di moduli fotovoltaici necessari si deve conoscere la quantità di energia che il sistema fotovoltaico deve generare durante le ore di sole. Questa energia deve essere sufficiente a soddisfare i consumi diurni e immagazzinare abbastanza energia per soddisfare le necessità durante le ore notturne.

Ogni sistema di stoccaggio ha un rendimento caratteristico ($\eta_{G,acc}$) che dipende dall'effi-

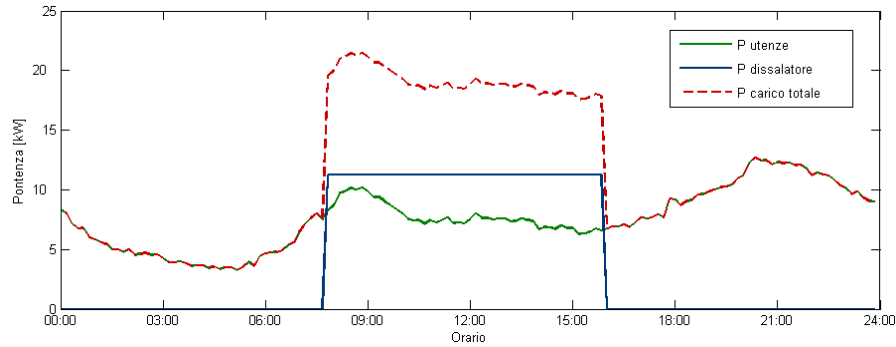


Figura 3.3: Andamento temporale dei consumi delle abitazioni e dell'impianto di dissalazione

cienza nella carica e nella scarica. In prima approssimazione, si può affermare che $\eta_{G,acc} = \eta_{carica} \cdot \eta_{scarica}$. Quindi a causa delle inefficienze del sistema di accumulo è necessario produrre una quantità di energia tanto maggiore quanto peggiore è l'efficienza. Ad esempio per un sistema di accumulo idraulico dell'energia il rendimento generale $\eta_{G,acc}$ pari al prodotto del rendimento della pompa e della turbina. Operando con una PAT ($\eta_P = 0,8$), possiamo aspettarci che difficilmente superi il 64% di efficienza ($\eta_{G,acc} = \eta_P^2$)

Per conoscere quanta energia è necessario produrre si parte dalle funzioni di carico delle utenze elettriche P_u e del dissalatore P_{ro} , si calcola la dalla quantità di energia necessaria durante le ore di sole E_{diur} e quella necessaria durante le ore notturne E_{nott} .

$$E_{diur} = \int_{diur} P_{car}(t) dt = 175,7 \text{ kWh}$$

$$E_{nott} = \int_{nott} P_{car}(t) dt = 97,6 \text{ kWh}$$

con $P_{car}(t) = P_u(t) + P_{ro}(t)$ il cui andamento temporale è rappresentato in figura 3.3.

Tenendo conto del rendimento di stoccaggio, continuando con l'ipotesi precedente ($\eta_{G,acc} = 0,64$), l'energia che il sistema fotovoltaico deve produrre è:

$$E_{PV,tot} = E_{diur} + \frac{E_{nott}}{\eta_{G,acc}} = 175,7 + \frac{97,6}{0,64} = 328,2 \text{ kWh}$$

Ora conoscendo l'energia necessaria e l'irraggiamento per m^2 possiamo calcolare la superficie necessaria e successivamente il numero di moduli fotovoltaici. Dato che il rendimento di stoccaggio influenza la superficie necessaria ogni configurazione impiantistica avrà un numero

di moduli differente.

$$A_{PV} = \frac{E_{diur} + \frac{E_{nott}}{\eta_{G,acc}}}{\eta_{PV} \int_0^{24} P_{sun}(t) dt} = \frac{E_{PV,tot}}{\dot{E}_{PV}} = \frac{328,2}{1,14} = 287,9 \text{ m}^2$$

La superficie di un modulo fotovoltaici standard (A_{mod}) è $1,6\text{m}^2$. Quindi il numero necessario di moduli è:

$$n_{tot} = \frac{A_{PV}}{A_{mod}} = \frac{287,9}{1,6} = 180$$

Successivamente, nella sottosezione 3.7 viene calcolato per ogni configurazione impiantistica il numero necessario di moduli. Si è scelto per rendere più rapido il dimensionamento del parco fotovoltaico di utilizzare un sistema modulare che abbia come potenza base circa 10kWp quindi ogni sottosistema è formato da stringhe di moduli e inverter. Sono stati scelti moduli SANYO da 250W e un inverter SMA da 10kWp. Partendo dalle caratteristiche di moduli e inverter i cui datasheet sono allegati si è dimensionato il sistema. Il numero di moduli totale è

$$n = \frac{P_{max,INV}}{P_{mod}} = \frac{10kW_p}{250kW_p} = 40$$

Il numero massimo di moduli per stringa dipende dalla tensione massima a vuoto che l'inverter può sopportare ($V_{OC,max}$) e da quella a vuoto dei moduli ($V_{OC,mod}$):

$$n_{max,st} = \frac{V_{OC,max}}{V_{OC,mod}} = \frac{1000}{43,1} = 23$$

la tensione nominale d'ingresso dell'inverter è pari a 600V a cui corrisponde il rendimento massimo. Il numero di moduli ideale sarebbe quindi:

$$n_{id} = \frac{V_{id,inv}}{V_{n,mod}} = \frac{600}{34,9} = 17$$

Dai valori calcolati si è scelto che ogni blocco dell'impianto fotovoltaico sia formato da un inverter e 40 moduli disposti in due stringhe da 20 moduli l'una. In seguito per ogni configurazione impiantistica il numero di blocchi e degli inverter necessari viene calcolato dividendo il numero di pannelli totali necessari per 40 e approssimando per eccesso.

$$n_{inv} = \frac{n_{tot}}{n}$$

3.6 Sistema di Accumulo dell'Energia

Durante le ore notturne vi è assenza di energia solare ma le abitazioni necessitano di elettricità anche durante questo periodo. Essendo il sistema isolato dalla rete elettrica è necessaria la presenza di un sistema che accumuli l'energia non utilizzata durante il giorno e la restituisca alle utenze di notte. A differenza dell'acqua l'energia accumulata non fluisce autonomamente verso le utenze ma è necessaria un'unità logica che regolando le macchine metta in produzione la quantità richiesta dal carico.

Per svolgere questa funzione si è pensato ad un accumulo idraulico dell'energia. Convenzionalmente si utilizza una macchina idraulica reversibile che nei momenti di eccedenza sfrutta l'energia per pompare acqua verso un bacino di monte, mentre in caso di necessità inverte il flusso e turbinata l'acqua scaricandola verso il bacino di valle. Le grandi potenze in gioco negli impianti idroelettrici tradizionali permettono l'installazione di grandi macchine che assicurano rendimenti elevati. Nel caso di realtà rurali, con piccole potenze in gioco, macchine di questo tipo con costi elevati non si giustificano e spesso sono di difficile reperibilità perché costruite su richiesta. Per questi motivi si è deciso di verificare la fattibilità di un impianto di accumulo idroelettrico usando comuni pompe (PAT) di facile reperibilità e con costi contenuti che con alcuni accorgimenti possono operare anche come turbine [15].

La semplicità e l'economicità di queste macchine ha portato alla scelta di un sistema di pompaggio a PAT e a valutarne il funzionamento anche con l'ausilio di un accumulo elettrochimico. Il sistema di pompaggio sfrutta come bacino di valle il mare, in quanto opere di presa sono già necessarie per l'impianto di dissalazione, mentre per l'accumulo a monte vi è la necessità di realizzare un bacino dedicato. Tubazioni e locale macchine completano le opere civili, mentre per la generazione di energia è necessaria una macchina sincrona (o come si vedrà una serie di macchine, nel caso di più PAT) che funzioni da generatore e da motore da accoppiare alla pompa, e un sistema che ne regoli la velocità per poter operare in range di potenza più ampi. Il primo impianto di pompaggio ad acqua di mare è stato realizzato nel 2000 nella parte settentrionale dell'isola di Okinawa in Giappone. Nell'immagine 3.4 si può osservare il bacino posto



Figura 3.4: Impianto di pompaggio nell'isola di Okinawa, Giappone

in prossimità del mare su una collina ad un'altezza di 150 m che può contenere fino a 564000 m³ di acqua a cui corrisponde un'energia accumulata di 230MWh.

Impianto idraulico Nel dimensionamento dell'altezza della quota del bacino di monte sono state scelte due quote a seconda della configurazione impiantistica: 30m e 70m. Va osservato che, a parità di acqua immagazzinata nel bacino, l'energia disponibile nel primo caso è circa la metà della seconda dato che l'energia potenziale è proporzionale alla quota.

$$E_{serb} = \rho V g h$$

Quindi se si vuole immagazzinare la stessa quantità di energia il bacino più basso dovrà essere circa il doppio più grande e questo influisce sui costi di costruzione.

La quota geodetica del bacino di monte influenza un ulteriore aspetto, infatti a parità di potenza, macchine che forniscono alte prevalenze hanno spesso rendimenti inferiori rispetto a macchine che operano a prevalenze minori. Quindi, se da un lato l'aumento della quota riduce il costo del bacino, dall'altro provocando una riduzione dell'efficienza del sistema, è richiesta una quantità maggiore di energia e di conseguenza un maggior numero di moduli fotovoltaici. Inoltre con la quota del bacino aumenta anche la lunghezza del tubo e quindi le perdite di carico distribuite.

Date le due quote e le due lunghezze delle tubazioni per valutare il corretto punto di funzionamento della macchina idraulica si è proceduto allo studio della caratteristica dell'impianto. Nella parte sinistra della figura 3.5 sono rappresentate le curve caratteristiche dell'impianto nel funzionamento da pompa, sopra la curva dell'impianto con bacino posto a 30m a sotto quella con bacino posto a 70, mentre nella parte sinistra ci sono le curve caratteristiche dell'impianto nel funzionamento da turbina. Per semplicità si è assunto che le perdite siano solo distribuite. Per ridurre al minimo le perdite dato che le basse pressioni lo consentono è scelto di usare tubi in PVC ad alta densità [21].

Le caratteristiche sono state ricavate con l'ausilio del MATLAB utilizzando l'equazione di Haaland per il calcolo del coefficiente d'attrito f :

$$\frac{1}{f} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]$$

dove

- D è il diametro = 0,18m
- ε è la rugosità che per un tubo in PVC = 0,002
- il Re varia con la portata

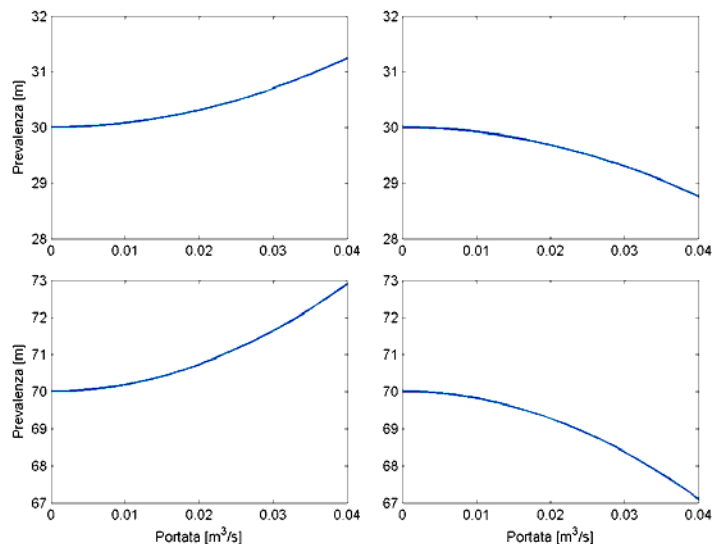


Figura 3.5: Curve caratteristiche dell'impianto

$$C_{imp} = h_{geod} \pm f \frac{2L}{g} \cdot \frac{\dot{V}^2}{\pi D^3}$$

Il segno \pm sta ad indicare che nel funzionamento da turbina le perdite si sottraggono all'altezza utile, mentre nel funzionamento da pompa le si sommano.

La Macchina idraulica La macchina idraulica è il cuore del sistema di stoccaggio e influenza funzionamento e dimensioni delle altre componenti. Il compito di questo organo è convertire l'energia meccanica proveniente dal motore/generatore in energia idraulica e viceversa. Questa operazione è possibile sfruttando il surplus di potenza che l'impianto fotovoltaico genera durante le ore diurne.

La curva disegnata nella figura 3.6 è un esempio dell'eccesso di potenza durante il giorno:

$$P_{surp} = P_{PV}(t) - P_{car}(t)$$

come si può osservare questa curva è molto variabile, come del resto è l'irraggiamento solare. Fare in modo che la maggior parte dell'energia disponibile sia immagazzinata attraverso un sistema di pompaggio non è così semplice in quanto ogni pompa ha una propria curva

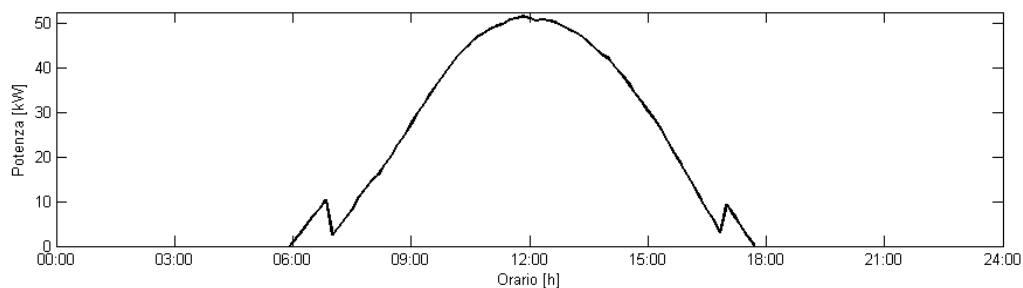


Figura 3.6: Curva di potenza del surplus disponibile

caratteristica che vincola a quei punti il suo funzionamento. Per operare con maggiore flessibilità, e per non dover attuare regolazioni dissipative, che non si giustificerebbero, quattro delle configurazioni impiantistiche analizzate utilizzano un inverter collegato alla macchina sincrona che attraverso la variazione della frequenza modifica la velocità di rotazione della pompa consentendole di operare in un range di funzionamento più vasto e quindi di sfruttare un intervallo maggiore di potenze e immagazzinare una quantità maggiore di energia [22].

Il sistema di pompaggio deve poter sfruttare dal più piccolo valore di potenza a quello maggiore o comunque deve cercare di avvicinarsi a questi valori. Per questi motivi è importante scegliere la taglia o le taglie delle macchine che svolgono questa operazione.

Partendo dal diagramma a ventaglio (vedi allegato 5.1) di un costruttore si è scelto quelle in grado di operare alla prevalenza necessaria, con potenze congrue a quelle del surplus e con i rendimenti maggiori possibili. Per ognuna delle tre macchine scelte si è costruita la curva caratteristica interpolando i punti di funzionamento forniti dal costruttore (vedi tabelle in allegato 5.2 5.3). Questa curva intersecando quella dell'impianto mostra il punto di funzionamento della macchina, necessario per conoscere potenza assorbita e la portata che integrata nel tempo dà l'informazione su quanta acqua è stata portata al bacino o quanta ne è stata prelevata.

Ad ogni velocità di rotazione corrisponde una curva caratteristica che è possibile conoscere applicando la teoria della similitudine idraulica:

$$h_1 = h_2 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

$$q_1 = q_2 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)$$

Usando queste equazioni per le macchine pilotate dall'inverter è possibile prevedere la variazione della curva caratteristica in funzione della velocità di rotazione, compresa tra la

velocità massima consigliata dal costruttore e quella minima a cui la portata è pari a quella minima consigliata.

Per la completa conoscenza del comportamento della macchina, oltre a individuare il punto di funzionamento eguagliando l'equazione caratteristica dell'impianto a quella della macchina, è necessario avere a disposizione l'equazione del rendimento che è in prima approssimazione funzione della portata. La curva di rendimento che lega potenza meccanica assorbita e potenza idraulica si disegna a partire dai datasheet forniti dal costruttore e posti in allegato.

L'aver collezionato tutte le informazioni precedenti permette istante per istante di conoscere la velocità della macchina che assorba la potenza che in quel momento il sistema fotovoltaico mette a disposizione. Il codice di MATLAB data la potenza disponibile calcola, utilizzando le curve sopra descritte, il numero di giri a cui la macchina deve funzionare e la portata elaborata.

Partendo dall'equazione della potenza per una pompa:

$$P_{pump} = \frac{\rho g h Q}{\eta_{idr} \eta_{tr} \eta_{el} \eta_{inv}}$$

in cui P_{pump} è la potenza elettrica fornita alla pompa ed equivale a P_{surp} .

Dato che il punto di funzionamento della pompa è vincolato ai punti della caratteristica dell'impianto, per conoscere Q si sostituisce ad h l'equazione caratteristica dell'impianto, e al rendimento la sua equazione anch'essa funzione di Q .

Si ricava quindi un'equazione funzione di Q che il calcolatore risolve.

$$P_{pump} = \frac{\rho g h(Q) \cdot Q}{\eta_{idr}(Q) \eta_{tr} \eta_{el} \eta_{inv}}$$

Conoscendo la portata il calcolatore procede per iterazioni e calcolata attraverso la similitudine idraulica la velocità di rotazione che porta la macchina ad intersecare la curva dell'impianto a quel dato valore di Q .

In questo modo per ogni macchina si può conoscere la velocità di rotazione e quindi la frequenza che l'inverter deve fornire al motore accoppiato alla pompa per ogni dato valore di potenza disponibile.

Le macchine idrauliche hanno però dei vincoli costruttivi che ne limitano il funzionamento. Il limite inferiore è determinato dalla portata minima o dal livello troppo basso del rendimento che porterebbero la macchina a funzionare male, mentre quello superiore è solitamente funzione della velocità di rotazione massima consigliata dal costruttore per evitare danneggiamenti. Questi due limiti si traducono in limiti di potenza assorbita: per ogni macchina oltre alla potenza nominale si può calcolare potenza massima e potenza minima assorbita.

$$P_{min} = \frac{\rho g h(Q_{min}) \cdot Q_{min}}{\eta_g(Q_{min})}$$

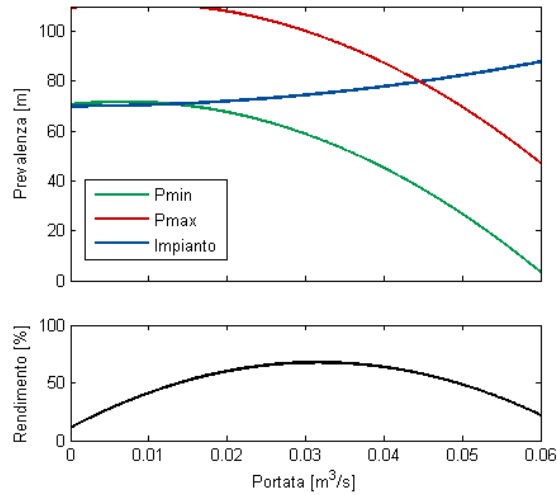


Figura 3.7: Curve relative alla macchina N65-250 - Pompa

$$P_{max} = \frac{\rho g h(Q_{n=n,max}) \cdot Q_{n=n,max}}{\eta_g(Q_{n=n,max})}$$

Per ogni macchina utilizzata sono stati calcolati parametri ed equazioni precedentemente esposte illustrati con maggior dettaglio nella sottosezione 3.7. Nella figura 3.7 vi è un esempio dei limiti funzionali di una delle macchine scelte.

La macchina idraulica come turbina La macchina usata precedentemente per accumulare energia può essere usata con alcuni accorgimenti anche come turbina per generare energia. Pompe e usate come turbine vengono chiamate Pump used as Turbine. Le PAT vengono spesso utilizzate per la produzione di energia elettrica per piccole potenze e in zone povere in cui il l'economicità è più importante del rendimento. Dagli anni '80 in poi molti studi sono stati eseguiti per prevedere il funzionamento in modalità di turbina. Molti di questi puntano attraverso l'analisi di dati sperimentali alla costruzione di equazioni per prevedere il BEP (best efficiency point) ossia individuare il valore di portata e prevalenza della macchina in funzionamento da turbina che assicura il rendimento più elevato possibile, che spesso equivale al rendimento massimo in funzionamento da pompa. Uno di questi studi Sharma [] afferma che partendo dal BEP_P della pompa e conoscendo il rendimento della pompa ($\eta_{max,P}$) è possibile calcolare il BEP_T :

$$H_{T,bep} = \frac{H_{P,bep}}{\eta_{max,P}^{1,2}}$$

$$Q_{T,bep} = \frac{Q_{P,bep}}{\eta_{max,P}^{0,8}}$$

Questi risultati che predicono il BEP della macchina in funzionamento da turbina sono utili per la scelta della macchina ottima, ma dato che viene usata la stessa macchina sia per pompare che per generare energia alcune precisazioni sono necessarie.

Quando la macchina funziona come turbina per rappresentare il suo funzionamento è necessario, come per la pompa, conoscere la sua curva caratteristica. Anche la previsione del comportamento della macchina fuori dalle condizioni di BEP è stata oggetto di studi. Attraverso i polinomi creati a partire da prove sperimentali effettuate da Derakhshan e Nourbakhsh [23] è possibile costruire la caratteristica della PAT:

$$\frac{H_T}{H_{T,bep}} = 1,0283 \left(\frac{Q_T}{Q_{T,bep}} \right)^2 - 0,5468 \left(\frac{Q_T}{Q_{T,bep}} \right) + 0,5314$$

mentre per calcolare il rendimento definito come:

$$\eta_T = \frac{P_T}{\rho g Q_T H_T}$$

è necessario conoscere la caratteristica della potenza ottenibile usando il seguente polinomio:

$$\frac{P_T}{P_{T,bep}} = -0,3092 \left(\frac{Q_T}{Q_{T,bep}} \right)^3 + 2,1472 \left(\frac{Q_T}{Q_{T,bep}} \right)^2 - 0,8865 \left(\frac{Q_T}{Q_{T,bep}} \right) + 0,0452$$

Con lo stesso metodo spiegato precedentemente anche per il funzionamento da turbina sono stati realizzati dei calcoli per prevedere la quantità di acqua necessaria e la velocità di funzionamento per ogni valore di potenza che la PAT deve produrre per soddisfare le esigenze del carico. I valori limite della portata e della velocità di rotazione si ripercuotono sulla potenza massima e minima che la PAT può produrre. Il limite inferiore di portata è dovuto all'annullamento della coppia motrice generata dalla macchine (curva verde nella figura 3.8) mentre quello superiore si verifica quando la velocità di rotazione si annulla (curva magenta), infatti a differenza della pompa la potenza maggiore si verifica in corrispondenza della velocità nulla.

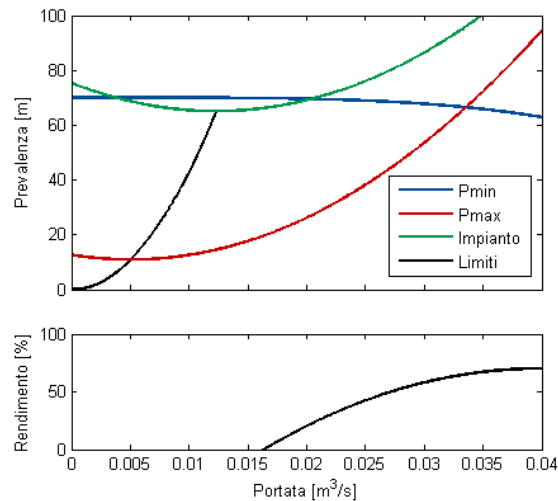


Figura 3.8: Curve relative alla macchina N65-250 - Turbina

Come nella pompa anche nella turbina la velocità massima consentita delimita il funzionamento (curva rossa). Il punto di funzionamento come mostrato in figura 3.8 è vincolato sulla curva dell'impianto e contenuto entro le due curve caratteristiche limite. Nella sottosezione 3.7 saranno illustrate nel dettaglio le caratteristiche delle macchine utilizzate nella simulazione dell'impianto.

3.6.1 L'accumulo elettrochimico

Il principale limite nell'operare con delle pompe reversibili è determinato dai limiti di funzionamento caratteristici delle macchine e dai rendimenti che decrescono spostandosi dalle condizioni di design. A differenza delle macchine idrauliche le batterie ad accumulo elettrochimico non soffrono di questi difetti e sono in grado se correttamente dimensionate di recuperare tutta l'energia in surplus con buone efficienze. A fronte di rendimenti maggiori rispetto alle PAT presentano costi molto più elevati e, a seconda della tecnologia, durate di vita ridotte che dipendono dalle modalità di utilizzo.

Nel progetto alcune soluzioni impiantistiche sono integrate dall'ausilio di batterie che nei momenti in cui le potenze in gioco sono molto basse e l'impianto di pompaggio non è in grado di funzionare, assorbono l'energia in surplus. In questo modo si cerca di garantire un rendimento maggiore del sistema. Mentre in una delle ipotesi impiantistiche si è scelto di accumulare energia con sole batterie per aver una confronto tra questo sistema di accumulo tradizionale e i micro impianti idroelettrici a PAT.

Per le batterie è stata scelta la tecnologia Li-ion, che assicura ottimi rendimenti e tempi di vita maggiori rispetto alla tradizionale tecnologia al piombo. Naturalmente alla maggior efficienza e durata corrispondono costi maggiori, pari a circa $450\text{€}/kWh_{acc}$ [24].

3.7 Configurazioni impiantistiche

La difficile relazione tra rendimento e costi di impianti non ha consentito una scelta impiantistica a priori. Si è quindi scelto di analizzare le configurazioni impiantistiche che ad una prima analisi potevano risultare adatte all'accumulo di energia. Alcune di queste soluzioni funzionano con l'ausilio di batterie al fine di migliorare le prestazioni, le altre accumulano l'energia solo attraverso l'impianto di pompaggio e nel caso di sovrapproduzione dissipano o dissipano l'eccesso.

Quando presente si è scelto che la batteria operi nei momenti in cui le basse potenze disponibili o richieste non siano sufficienti a mettere in funzione l'impianto di pompaggio. In questo modo la batteria accumula l'energia che l'impianto di pompaggio non è in grado di accumulare e la cede quando il carico richiesto scende al di sotto della potenza minima generabile dalla PAT, o quando il carico è maggiore della potenza massima generabile. In questo secondo caso il sistema batteria integra alla rete la differenza tra la potenza richiesta e quella prodotta dalla PAT.

Uno degli obiettivi preposti oltre all'economicità dell'impianto è anche la sua semplicità. La presenza della batteria aumenta la complessità e anche se aumenta l'efficienza può portare ad un peggioramento dell'impianto in quanto un sistema complesso è più debole e vulnerabile. In quest'ottica si è deciso di valutare anche la possibilità che l'unico accumulo sia quello idraulico. In queste soluzioni a causa dei range di funzionamento delle macchine idrauliche non tutta l'energia disponibile è accumulabile. In pompaggio la macchina idraulica inizierà ad operare solo quando la potenza disponibile è maggiore della potenza minima di lavoro, mentre nel funzionamento da turbina, se la potenza richiesta è minore di quella minima producibile, la macchina funziona al minimo e il resto dell'energia non richiesta è dissipata.

Le configurazioni ipotizzate si distinguono per numero e dimensione delle macchine, flessibilità di operazione, presenza o assenza di batterie. Di seguito vengono analizzate caso per caso le seguenti soluzioni impiantistiche:

1. Sistema di accumulo con solo una macchina idraulica con controllo di velocità di rotazione con batteria
2. Sistema di accumulo con solo una macchina idraulica con controllo di velocità di rotazione
3. Sistema di accumulo con due macchine idrauliche di cui una a giri variabili con batteria
4. Sistema di accumulo con due macchine idrauliche di cui una a giri variabili

5. Sistema di accumulo con n macchine idrauliche a giri fissi con batteria
6. Sistema di accumulo con n macchine idrauliche a giri fissi
7. Sistema di accumulo elettrochimico a batteria

Per ognuna di queste configurazioni è stato elaborato un codice in MATLAB che ne simula il funzionamento durante una giornata tipo del mese di Aprile. Il programma calcola in modo iterativo il rendimento del sistema in modo che la quantità di acqua contenuta nel bacino a fine giornata sia la stessa presente all'inizio, lo stesso criterio vale per l'energia accumulata dalla batteria. Quindi per ogni caso studiato il codice restituisce

- potenza di picco dell'impianto fotovoltaico P_{PV}
- rendimento di accumulo $\eta_{G,acc}$
- dimensione del bacino V_{bac}
- dimensione batteria E_{bat}

3.7.1 Configurazione 1: PAT e batteria

In questa configurazione l'impianto di pompaggio è composto da una sola macchina idraulica il cui asse è calettato su quello di una macchina elettrica sincrona comandata da un inverter per la regolazione della frequenza e quindi della velocità di rotazione. Questa soluzione impiantistica è caratterizzata da una buona semplicità in quanto è presente una sola macchina che può operare a velocità variabile sia in funzionamento da pompa sia in funzionamento da turbina. La natura della macchina presenta dei limiti di operazione e quindi dei limiti in potenza. Esistono quindi un valore massimo e un valore minimo di potenza elettrica fornibile alla macchine in fase di accumulo e altrettanti limiti in fase di produzione. Dato il differente funzionamento da pompa e da turbina questi valori differiscono.

La pompa scelta per questo impianto è la CALPEDA N65-250A. Come spiegato precedentemente partendo dalla curva caratteristica fornita dal costruttore si possono calcolare per il funzionamento da pompa e da turbina il numero di giri massimo e minimo e quindi il range di potenza. I grafici che mostrano le curve caratteristiche limite sono già state mostrate nelle figure 3.7 e 3.8.

A cui corrispondono i seguenti valori di potenza (in kW):

| $P_{min,P}$ | $P_{max,P}$ | $P_{min,T}$ | $P_{max,T}$ |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 15,5 | 48,1 | 3,1 | 14,1 |

Questi limiti determinano anche il funzionamento della batteria. Se la potenza disponibile è minore di $P_{min,P}$ la batteria si carica accumulando $P_{surp} \cdot \Delta t \cdot \eta_{bat}$, se invece la potenza disponibile è maggiore di $P_{max,P}$ l'impianto di pompaggio continua a funzionare a potenza massima e la differenza è accumulata dalla batteria $(P_{surp} - P_{max,P}) \cdot \Delta t \cdot \eta_{bat}$. Se la batteria è carica nessuna energia è immagazzinata.

Quando nella fase di produzione vengono oltrepassati i limiti di operatività della PAT, la batteria fornisce l'energia mancante. Se il carico richiede una potenza minore di quella producibile dalla PAT, allora la batteria si scarica dell'energia necessaria per poter soddisfare il carico $(P_{car} \cdot \Delta t)$, mentre se il carico richiede una potenza maggiore di quella producibile, la batteria compensa il deficit fornendo l'energia necessaria $((P_{car} - P_{max,T}) \cdot \Delta t)$. Se la batteria è completamente carica il programma simula la sua scarica fino al 60% del SoC in modo da ridurre la quantità di energia fornita dalla turbina e quindi la quantità di acqua turbinata.

La simulazione della giornata tipo restituisce il seguente grafico in figura 3.9 e i seguenti dati:

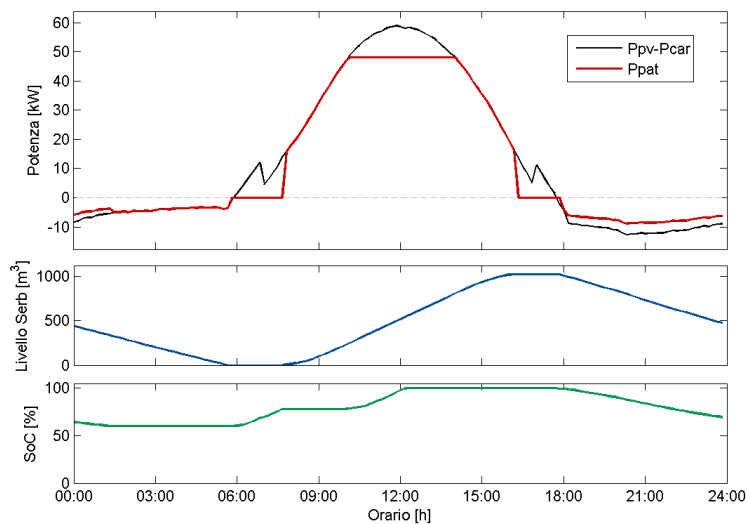


Figura 3.9: Simulazione della configurazione 1

Come si può osservare dalla figura nei periodi in cui la potenza disponibile non è sufficientemente elevata l'impianto di pompaggio è fermo e l'energia viene immagazzinata nella batteria che però verso le 12:00 è completamente piena quindi parte dell'energia in surplus non viene accumulata ne nel bacino ne nella batteria.

Questa situazione potrebbe migliorare aumentando la dimensione della batteria che però porterebbe solo ad un aumento dei costi senza

| | |
|-----------------|------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,24 |
| $P_{PV} [kW]$ | 75,5 |
| $V_{bac} [m^3]$ | 1020 |
| $E_{bat} [kWh]$ | 69,3 |

Tabella 3.1: Sim. 1

apportare benefici sostanziali. Nella fase di produzione, dalle 18:00 in poi, dato che la batteria è piena la PAT viene fatta lavorare ad una potenza inferiore e la batteria si scarica. A fine giornata sia batteria che serbatoio tornano al livello iniziale per poter cominciare un nuovo giorno.

3.7.2 Configurazione 2: PAT senza batteria

Nella soluzione senza la batteria la macchina è la stessa del caso precedente e presenta gli stessi range operativi. Questo significa che l'accumulo non viene attivato finché $P_{surp} \geq P_{min,P}$, mentre nei momenti in cui $P_{surp} \geq P_{max,P}$ l'impianto continua a funzionare alla potenza massima $P_{max,P}$ accumulando solo parte dell'energia disponibile. Quando invece il sistema deve produrre, se $P_{car} \leq P_{min,T}$ non vi è altra possibilità che turbinare a $P_{min,T}$ e dissipare l'eccesso, mentre la potenza massima fornibile al carico è limitata alla potenza massima producibile dalla turbina $P_{max,T}$.

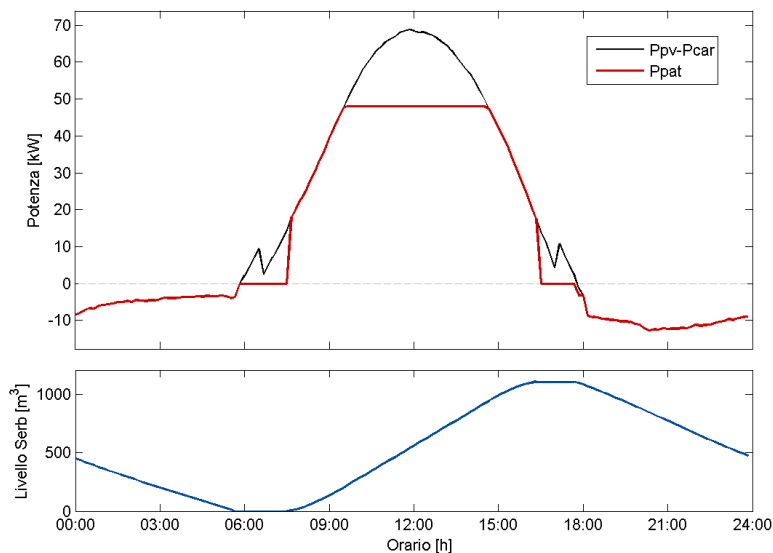


Figura 3.10: Simulazione della configurazione 2

| | |
|-----------------|------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,2 |
| $P_{PV} [kW]$ | 85,5 |
| $V_{bac} [m^3]$ | 1110 |

Tabella 3.2: Sim. 2

Dalla figura 3.10 si può valutare la simulazione della seconda configurazione senza la batteria: il funzionamento del sistema di accumulo è pressoché simile al funzionamento nel caso precedente e dai dati della tabella 3.2 si vede come il rendimento sia cambiato relativamente poco, così come la potenza dell'impianto fotovoltaico e la dimensione del bacino.

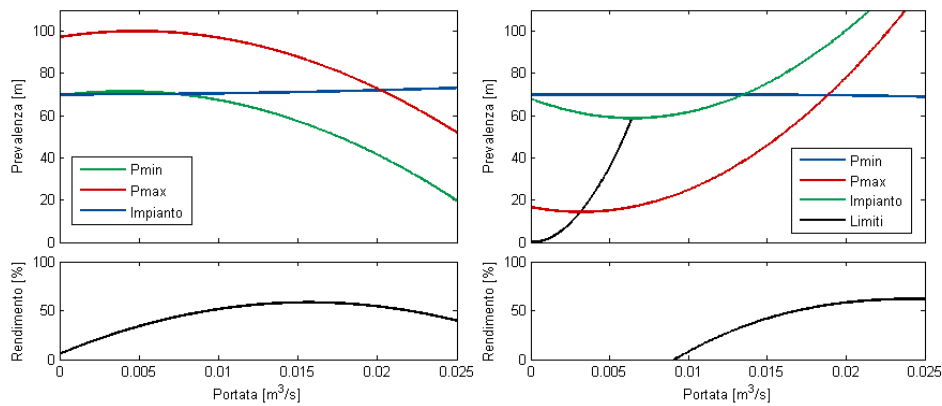


Figura 3.11: Curve caratteristiche della macchina 50-250A in modalità pompa e turbina

Nel caso precedente la presenza della batteria assicura un'efficienza maggiore e un funzionamento più corretto senza dissipazione di energia. L'aumento di efficienza va a scapito di una maggior complessità del sistema e provoca dei costi impiantistici maggiori, ma permette una riduzione della superficie fotovoltaica. In questo caso invece, a fronte di una minor efficienza e una maggior semplicità impiantistica il sistema fotovoltaico deve produrre una quantità maggiore di energia dato che in alcuni momenti l'impianto di pompaggio è impossibilitato a funzionare.

3.7.3 Configurazione 3: due PAT e batteria

La seconda configurazione impiantistica ipotizzata utilizza per accumulare e produrre energia, due PAT e la batteria. Le macchine idrauliche scelte per questa configurazione sono entrambe due pompe CALPEDA N50-250A. Al fine di immagazzinare la maggior quantità di energia proveniente dall'impianto fotovoltaico una delle due macchine è dotata di inverter che, attuando il controllo sulla velocità di rotazione, permette il funzionamento del sistema di accumulo anche lontano dalla potenza nominale. Come nel caso precedente, per la macchina a velocità variabile, esistono dei limiti di lavoro determinati dalla portata minima consigliata ($Q_{min} = 6l/s$) e dalla velocità massima di sicurezza ($3200rpm$); le curve caratteristiche riferite alla potenza massima e minima sono mostrate nella parte sinistra della figura 3.11. Nella stessa immagine sulla destra sono rappresentate le curve limite di funzionamento relative alla stessa PAT in funzionamento inverso, mentre in tabella 3.3 sono esposti i valori di potenza (in kW) caratteristici della PAT.

Al crescere della potenza disponibile (P_{surp}) il sistema inizia ad accumulare energia. Se P_{surp} è minore della potenza minima di funzionamento della macchine a velocità variabile

| $P_{min,P}$ | $P_{n,P}$ | $P_{max,P}$ | $P_{min,T}$ | $P_{max,T}$ |
|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 10,8 | 18,8 | 26,5 | 3,1 | 7,2 |

Tabella 3.3: Range di funzionamento della macchina idraulica

l'energia viene accumulata dalla batteria. Se invece la potenza disponibile è compresa tra la potenza massima e minima allora l'energia è trasformata dalla macchina idraulica e accumulata nel bacino. Quando al crescere del sole vi è un ulteriore incremento di potenza la seconda macchina inizia a lavorare a velocità nominale mentre quella che era in funzione adatta la sua velocità per sfruttare la potenza restante ($P_{surp} - P_{n,P}$). Ricapitolando, se:

- $P_{surp} < P_{min,P}$ l'energia è accumulata dalla batteria
- $P_{min,P} \leq P_{surp} \leq P_{max,P}$ la macchina a velocità variabile funziona in accumulo
- $P_{max,P} < P_{surp} < P_{n,P} + P_{min,P}$ la macchina continua a funzionare a $P_{max,P}$ e la differenza è accumulata dalla batteria
- $P_{min,P} + P_{n,P} \leq P_{surp} \leq P_{max,P} + P_{n,P}$ una macchina funziona a potenza nominale, l'altra accumula la potenza rimanente ($P_{surp} - P_{n,P}$)
- $P_{surp} > P_{max,P} + P_{n,P}$ il sistema lavora alla potenza massima ($P_{n,P} + P_{max,P}$) e l'energia rimanente è raccolta dalla batteria.

La scelta di usare due macchine idrauliche è nata dall'idea che usando una delle due a potenza nominale, quindi operando sempre a rendimento massimo, si possa aumentare l'efficienza e risparmiare l'installazione dell'inverter.

Nei momenti in cui è necessario produrre energia, il sistema macchina idraulica-batteria fornisce la potenza sufficiente a soddisfare le richieste del carico. Anche in questo caso la macchina presenta dei limiti, perciò, se il carico richiede una potenza inferiore a quella producibile l'unità logica decide come operare in funzione del SoC della batteria: se la batteria è carica, la PAT viene spenta e l'energia inviata al carico proviene esclusivamente dalla batteria; se al contrario la batteria è scarica, la PAT viene messa in produzione, parte dell'energia andrà al carico e parte verrà accumulata dalla batteria. Quando invece il valore di potenza richiesta (P_{car}) è compreso nei limiti di funzionamento della PAT questa fornisce l'energia necessaria modificando la velocità di rotazione. Un ulteriore incremento di potenza richiesta oltre la potenza massima producibile dalla macchina viene gestito connettendo la batteria che fornisce la potenza mancante ($P_{car} - P_{max,T}$), infatti come si può osservare in figura 3.12 dopo il tramonto la PAT produce la potenza massima generabile e la batteria si scarica.

Data la compatibilità della potenza massima richiesta dal carico e la potenza massima generabile dal congiunto macchina idraulica-generatore a velocità variabile, è possibile installare

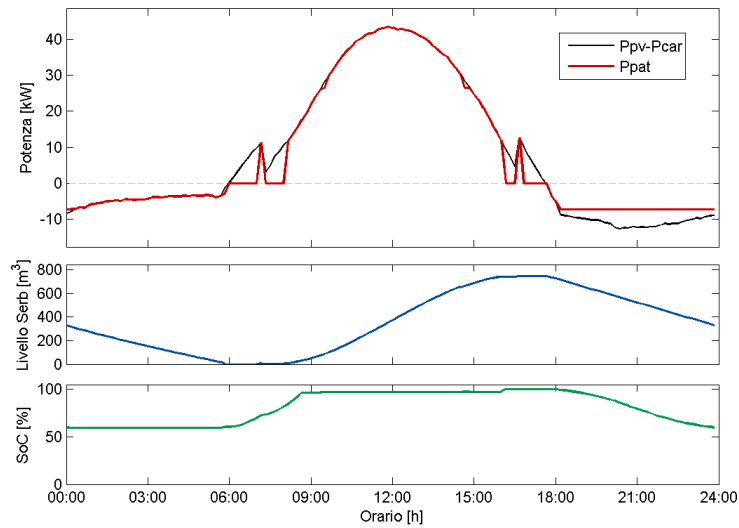


Figura 3.12: Simulazione della configurazione 3

solo un generatore dato che la presenza della batteria può compensare i deficit di produzione. In questo modo si ha una macchina idraulica calettata ad un generatore sincrono a magneti permanenti comandato dall'inverter, mentre l'altra può essere una semplice pompa trascinata da un motore asincrono. Questo permette un leggero aumento del rendimento rispetto alla soluzione precedente mantenendo comunque una buona economicità del sistema.

La simulazione per la verifica dell'andamento temporale delle potenze e livelli di accumulo è mostrata in figura 3.12 mentre i coefficienti che caratterizzano questa soluzione impiantistica sono riportati in tabella 3.4.

Dall'analisi temporale del sistema, si può osservare che il sistema di accumulo segue abbastanza bene tutti i livelli di potenza disponibile, mentre nelle ore notturne la potenza producibile non è sufficiente a soddisfare il carico viene quindi connessa la batteria che caricata durante le ore diurne dispone dell'energia necessaria per fornire la potenza mancante al carico. La batteria esegue solo una carica e una scarica durante le ventiquattro ore.

| | |
|-----------------|------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,33 |
| $P_{PV} [kW]$ | 61,8 |
| $V_{bac} [m^3]$ | 764 |
| $E_{bat} [kWh]$ | 57,8 |

Tabella 3.4: Sim. 3

3.7.4 Configurazione 4: due PAT senza batteria

Questa soluzione è simile a quella precedente ma senza l'ausilio della batteria e quindi con una logica operativa leggermente differente: il funzionamento in accumulo, come precedentemente, è limitato agli intervalli in cui $P_{min,P} \leq P_{surp} \leq P_{n,P} + P_{max,P}$ ma in questo caso

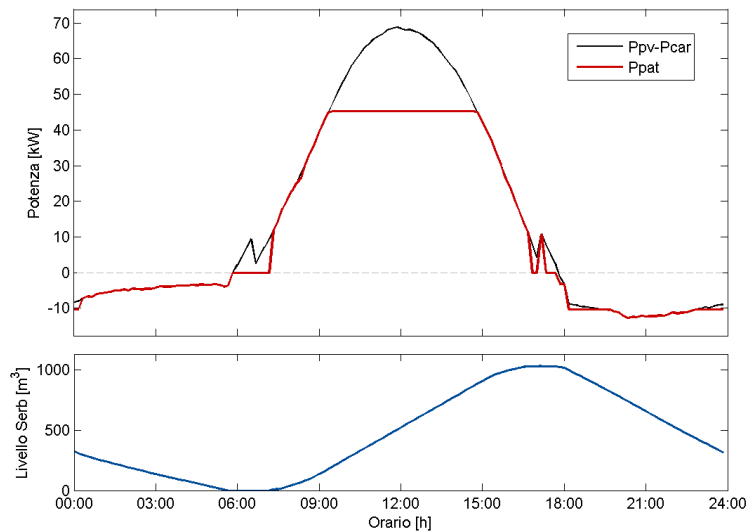


Figura 3.13: Simulazione della configurazione 4

nessuna batteria immagazzina l'energia fuori dal range considerato causando un decremento del rendimento globale. Per quanto riguarda il sistema di produzione l'assenza della batteria, che precedentemente compensava i deficit, impone l'installazione di un generatore anche sulla seconda macchina che opera a velocità nominale. Mentre nei casi in cui $P_{car} \leq P_{min,T}$ è necessario turbinare alla potenza minima e dissipare la differenza non fornita al carico.

Dall'andamento lungo le ventiquattro ore mostrato in figura 3.13, si può osservare come nelle ore centrali della giornata la potenza massima del sistema di accumulo non sia sufficiente ad immagazzinare tutta l'energia messa a disposizione dall'impianto fotovoltaico. Questo fatto penalizza fortemente il rendimento totale (tabella 3.5) in quanto molta dell'energia prodotta non viene immagazzinata.

3.7.5 Configurazione 5: n macchine e batteria

| | |
|-----------------|------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,18 |
| $P_{PV} [kW]$ | 92,3 |
| $V_{bac} [m^3]$ | 1073 |

Tabella 3.5: Sim. 4

Il sistema sotto descritto è stato ipotizzato osservando il comportamento delle macchine nelle configurazioni precedenti. Se da un lato la possibilità di variare la velocità di rotazione permette una maggiore flessibilità d'uso, dall'altro ogni volta che la macchina lavora offdesign, il rendimento decresce ripercuotendosi sull'efficienza globale. Si è quindi verificato il funzionamento in parallelo di più macchine, che lavorano a velocità costante e con potenze inferiori, in modo da operare sempre in condizioni di rendimento massimo.

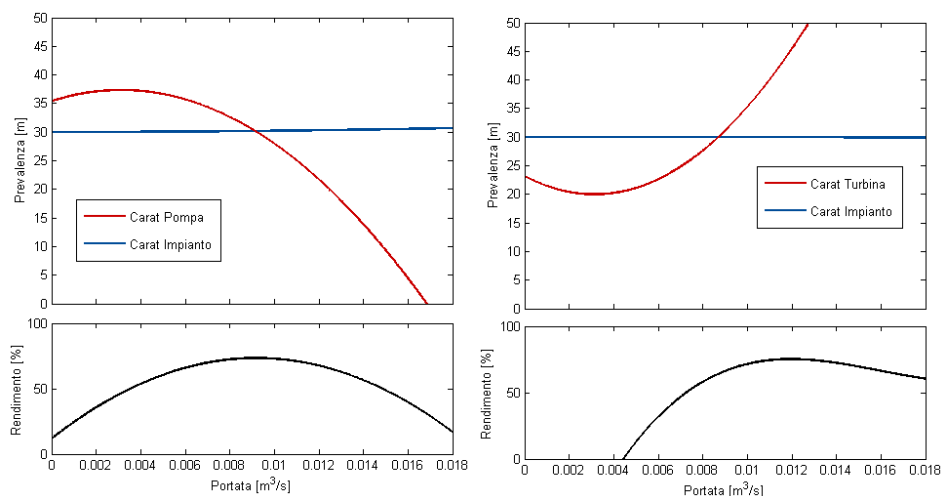


Figura 3.14: Punti di funzionamento macchina N40-160

Nella ricerca della PAT si è cercata quella che unisse nella stessa macchina alta prevalenza, alto rendimento e bassa potenza nominale. Pompe centrifughe che operano a prevalenza elevate (70m) e basse potenze (4-5kW), sono difficilmente realizzabili e quindi hanno rendimenti bassi (30%) si è deciso per questa configurazione di porre l'ipotetico bacino ad una quota di 30m. In questo modo anche se il bacino dovrà essere di dimensioni maggiori è presumibile che il rendimento dell'impianto sia maggiore riducendo le dimensioni dell'impianto fotovoltaico.

L'utilizzo di macchine di bassa potenza è finalizzato ad accumulare la maggior quantità di energia possibile, infatti le macchine in parallelo operano a step: finché la potenza disponibile non è sufficiente ad attivare l'n-esima macchina l'impianto lavora a n-1. Quindi minore è la potenza nominale meno tempo intercorre tra l'ingresso in funzione di due macchine. La scelta è ricaduta sulla pompa CALPEDA N40-160 di 3,7kW di potenza nominale. Le caratteristiche della macchina come pompa e come PAT sono mostrate in figura 3.14.

In questo caso ci si è limitati, costruendo le curve di impianto e della macchina, a individuare il punto di funzionamento, che è lo stesso per tutte le macchine e naturalmente varia a seconda dalla modalità di operazione. In pompaggio ogni macchina elabora una portata di 9,2l/s che coincide con quella che permette il rendimento massimo ($\eta_{max,P} = 0,73$). La curva caratteristica del funzionamento inverso individua una portata turbinata di 8,7l/s con un rendimento del 64%. Ogni singola PAT produce una potenza pari a 1,7kW.

Anche per questo tipo di impianto si è scelto di verificarne il funzionamento con e senza batteria. Si è scelto che la batteria possa integrare, quando è carica la potenza mancante per attivare una macchina in più, mentre quando è scarica possa assorbire l'energia non accumulabile dall'impianto di pompaggio. Lo stesso metodo è stato ipotizzato per il funzionamento in

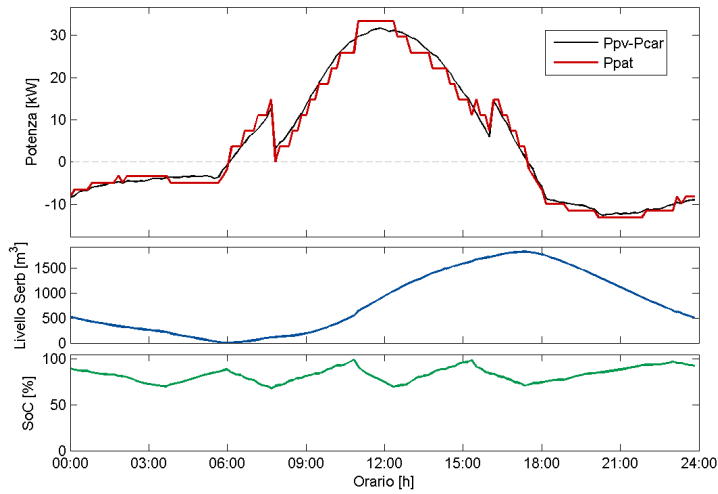


Figura 3.15: Simulazione della configurazione 5

produzione. Quindi in fase di accumulo se n è il numero di macchine che potrebbero funzionare con la sola P_{disp}

- e la batteria è carica, questa cede l'energia necessaria per metter in funzione $n + 1$ macchine e si scarica di $[P_{n,P}(n + 1) - P_{disp}] \frac{\Delta t}{\eta_{bat}}$
- e la batteria è scarica, il sistema lavora con n macchine e l'energia che avanza ricarica la batteria di $[P_{disp} - P_{n,P} \cdot n] \Delta t \cdot \eta_{bat}$

mentre in fase di produzione se n è il numero di macchine che assicurano la produzione sufficiente a soddisfare il carico ($n \cdot P_{n,T} > P_{car}$) se

- la batteria è carica, fornisce la differenza $[P_{car} - P_{n,T} \cdot (n - 1)] \frac{\Delta t}{\eta_{bat}}$, e si mettono in funzione $n - 1$ macchine
- la batteria è scarica, si mettono in funzione n macchine che la ricaricano della quantità $[P_{n,P} \cdot n - P_{car}] \Delta t \cdot \eta_{bat}$

Nella figura 3.15 si vede infatti che a volte la potenza dell'impianto di pompaggio è maggiore di quella disponibile e in quel momento si ha la scarica della batteria, altri in cui la potenza di pompaggio è minore e si ha la carica della batteria.

In questa soluzione impiantistica vi è una per una parte della potenza disponibile una doppia conversione, prima accumulata nella batteria e poi fornita alla macchina idraulica. È noto che ad ogni trasformazione parte dell'energia viene persa. La scelta di un funzionamento simile è dovuta al fatto che l'energia in assenza di batteria sarebbe comunque persa, quindi

anche il minimo accumulo può incrementare il rendimento globale di stoccaggio. I risultati della simulazione sono mostrati in tabella 3.6.

Il codice data la potenza nominale della macchina idraulica calcola il numero di PAT necessarie. Nel grafico in figura 3.15 ad ogni gradino della curva rossa corrisponde l'entrata in funzione di una PAT, se si osserva attentamente il numero di gradini nel funzionamento in pompaggio e in produzione non è lo stesso. Le macchine che devono operare in accumulo sono 9 mentre in produzione ne sarebbero necessarie solo 8, da questo si deduce che non tutte le PAT devono essere accoppiate a macchine elettriche reversibili, ma una di queste può essere pilotata da un semplice ed economico motore asincrono.

| | |
|-----------------|------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,49 |
| $P_{PV} [kW]$ | 49,5 |
| $V_{bac} [m^3]$ | 1830 |
| $E_{bat} [kWh]$ | 16,2 |

Tabella 3.6: Sim. 5

3.7.6 Configurazione 6: n macchine

In questa soluzione impiantistica l'assenza della batteria e della regolazione sulla macchina rotante impone che nei momenti di necessità la potenza prodotta sia sempre maggiore di quella richiesta perciò, per riequilibrare le potenze, si attua una dissipazione dell'energia non consumata. Nella fase di accumulo invece la potenza complessiva delle pompe non supera mai quella disponibile. Il comportamento descritto è evidente in figura 3.16, dove si può osservare come nella parte superiore del grafico la curva della potenza dell'impianto (rossa) sia sempre inferiore a quella disponibile ($P_{PV} - P_{car}$) mentre nella parte inferiore è sempre (in termini assoluti) superiore a quella richiesta dal carico.

Questa e la precedente configurazione hanno come vantaggio principale la semplicità impiantistica dato che nessun inverter è necessario. Confrontandole si può osservare come la presenza della batteria comporti un aumento di rendimento apprezzabile.

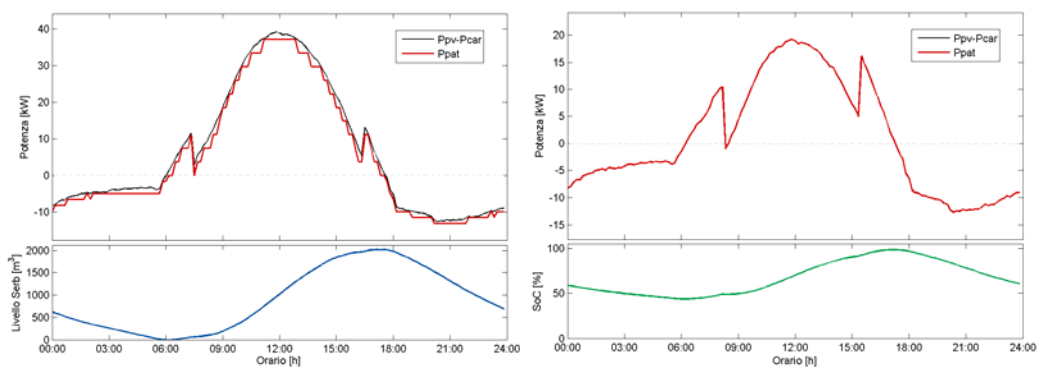


Figura 3.16: Simulazione della configurazione 6 e 7

| | |
|-----------------|-------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,383 |
| $P_{PV} [kW]$ | 59,5 |
| $V_{bac} [m^3]$ | 2023 |

Tabella 3.7: Sim. 6

In questo caso le macchine necessarie al funzionamento sono 10 in accumulo e 8 in produzione. Le considerazioni sulle macchine asincrone fatte precedentemente sono da considerarsi valide anche in questo caso. Il leggero incremento della PAT da installare è dovuto in prima analisi al decremento del rendimento: l'efficienza diminuisce, serve più superficie fotovoltaica, la potenza di picco aumenta quindi per sfruttare tutta la potenza disponibile servono più macchine.

3.7.7 Configurazione 7: accumulo con sola batteria

L'ultima configurazione che si è scelto di valutare è il più tradizionale accumulo elettrochimico a batterie. Il sistema è predisposto con regolatori di carica e batterie. Si è stimato un rendimento di carica e scarica del 90%, valore tipico di batterie Li-ion. In questa configurazione il rendimento globale maggiore rispetto e la possibilità di immagazzinare anche la più piccola quantità di energia permettono dimensioni molto minori dell'impianto fotovoltaico. Lo vantaggio principale delle batterie rispetto agli impianti ad accumulo idrico dell'energia è la breve durata di vita che dipende dalla frequenza dei cicli di carica e scarica e dalla profondità delle scariche. Inoltre le batterie a parità di energia immagazzinata hanno costi molto più elevati.

La dimensione della batteria è stata calcolata a partire dalla quantità di energia da accumulare e imponendo una profondità di scarica massima (DoD_{max}) pari al 60%, in modo che l'energia a inizio e fine giornata sia uguale. La batteria come si può osservare nella figura 3.16 si carica durante le ore diurne e si scarica durante quelle notturne effettuando ogni giorno solo un ciclo di carica/scarica. L'efficienza globale è semplicemente il prodotto tra il rendimento di carica e quello di scarica. I dati delle dimensioni caratterizzanti di questo sistema sono mostrati in tabella 3.8.

| | |
|-----------------|-------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,81 |
| $P_{PV} [kW]$ | 39,16 |
| $E_{bat} [kWh]$ | 193,8 |

Tabella 3.8: Sim. 7

3.7.8 Risultati

Dalle simulazioni effettuate precedentemente per ogni soluzione impiantistica vengono analizzati i dati più caratterizzanti al fine di poter comparare in modo oggettivo i vari sistemi di accumulo. I fattori che descrivono il funzionamento dell'impianto sono:

- Rendimento generale di accumulo dell'energia $\eta_{G,acc}$
- Superficie necessaria A_{PV} e potenza dell'impianto fotovoltaico P_{PV}
- Volume del bacino di stoccaggio V_{bac}
- Quota del bacino h_{bac}

- Dimensione della batteria E_{bat}
- Tipo e numero di macchine idrauliche n_{PAT}
- Tipo e numero di macchine sincrone n_{sinc}
- Tipo e numero di motori sincroni n_{asinc}
- Numero di inverter per il controllo delle macchine sincrone $n_{inv,PAT}$

Nel seguente grafico vengono confrontati i dati delle configurazioni precedenti. Mentre per un confronto numerico vedere la tabella 5.1 in allegato 5.

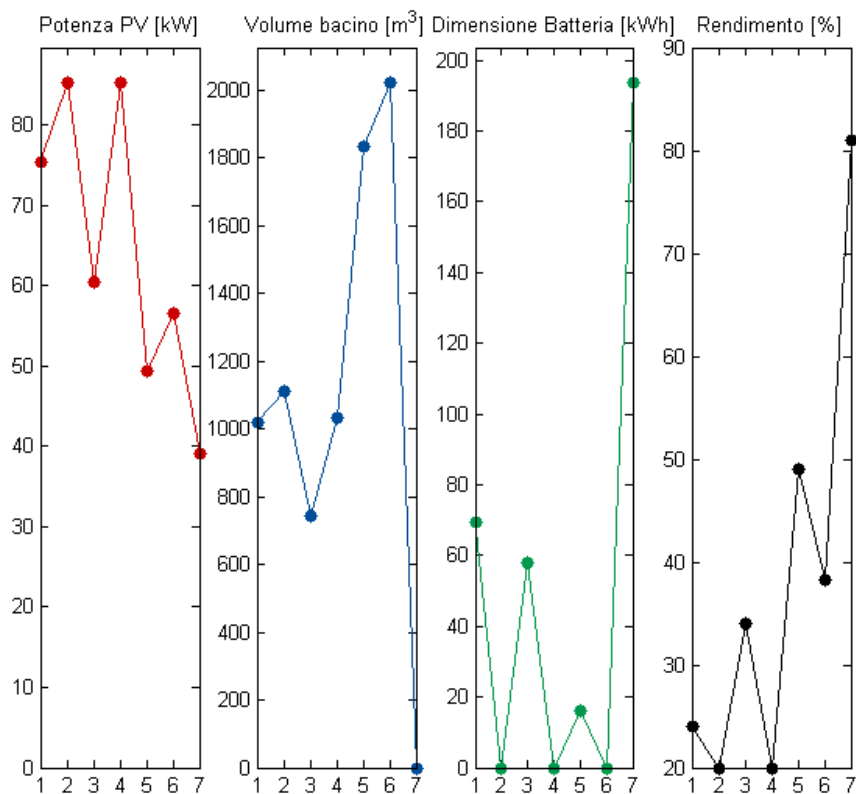


Figura 3.17: Confronto grafico tra i risultati ottenuti dalle simulazioni

Capitolo 4

Analisi e Ottimizzazione Tecnoeconomica

Le analisi eseguite precedentemente restituiscono per ogni sottosistema dei valori che costituiscono il metro per la comparazione delle possibili scelte. Ognuno dei parametri registrati influisce in un determinato modo sul funzionamento generale del sistema e sulle sue dimensioni. Un aumento del rendimento di accumulo contribuisce a ridurre la superficie fotovoltaica con un risparmio economico proporzionale all'incremento, va però detto che un miglior rendimento spesso si ottiene acquistando macchine o sistemi di macchine migliori a cui corrisponde un aumento del costo. Anche il numero di macchine se da una parte aumenta la complessità del sistema dall'altra lo rende entro un certo limite meno vulnerabile ai mal funzionamenti. Analizzando infatti le due situazioni impiantistiche più semplici (6 e 7) si può osservare come un aumento del numero di macchine comporti benefici al rendimento di accumulo. Il costo delle macchine però non è lineare con la potenza: due macchine di potenza P_n costano più che una macchina di potenza $2P_n$; vi è perciò un doppio legame tra rendimento ed economicità, se da un lato un'efficienza maggiore riduce il costo dell'impianto PV dall'altra comporta un aumento del numero di macchine e quindi del costo dell'impianto di accumulo.

Un'ulteriore dimensione legata al rendimento è la dimensione del bacino di accumulo, infatti minore è il rendimento della PAT, per ottenere la stessa quantità di energia è necessario turbinare una quantità maggiore di acqua, e quindi costruire un bacino di dimensioni maggiori. Lo stesso legame di proporzionalità inversa vi è tra la quota del bacino e la sua dimensione: un vaso per immagazzinare la stessa quantità di energia di un altro posto al doppio della sua quota deve contenere il doppio del volume di acqua. Va però notato che macchine di potenze nominali così basse generalmente hanno prestazioni che aumentano al diminuire delle prevalenze nominali e come detto precedentemente al diminuire del rendimento deve aumentare

la quantità di acqua immagazzinata. Infine all'aumentare della quota vi è un incremento della lunghezza delle condotte, quindi un aumento delle perdite di carico; quest'aspetto, se le tubazioni sono correttamente dimensionate, è pressoché trascurabile per variazioni di lunghezza piuttosto ridotte.

Si percepisce subito come la scelta più corretta non sia facile da individuare a priori. Parametrizzare tutti queste relazioni non è facile a causa della differenza dei rendimenti delle macchine che variano a seconda del costruttore. Per questo motivo e data la limitatezza dei casi ipotizzati, si è scelto di comparare le varie ipotesi su base economica, raccogliendo i prezzi dai costruttori o cercando costi medi in letteratura e dai listini dei costi per le opere civili disponibili sui siti web delle camere di commercio.

Per l'impianto fotovoltaico sono stati individuati i prezzi dei moduli, mentre per l'inverter si è scelto il costo medio pesato sulla potenza partendo dai prezzi di tre inverter da 10,15 e 20kW

- Moduli Sanyo HIT 250 : 250€/modulo
- Inverter SMA Tripower 10kW, 15kW, 20kW: 2970, 3190, 3560

Dividendo per la potenza al fine di ottenere un costo medio al kW:

$$\frac{250}{250} + \left(\frac{2970}{10} + \frac{3190}{15} + \frac{3560}{20} \right) \cdot \frac{1}{3} = 1,23 \text{ €/kW}_p$$

Per le macchine idrauliche si è utilizzato il relativo listino prezzi:

| | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------|
| N40-160 A/A | N50-200 A/A | N50-250 S/A | N65-250 A |
| 638€ | 769€ | 936€ | 1362€ |
| 5,5kW | 11kW | 22kW | 37kW |
| 116€/kW | 70€/kW | 42€/kW | 37€/kW |

Come si può osservare il prezzo non aumenta linearmente con la potenza. Come prima ipotizzato il prezzo specifico (€/kW) diminuisce all'aumentare della potenza. Quindi in prima approssimazione sarebbe meglio avere poche macchine (o addirittura una sola); però una macchina sola impone un range di funzionamento ridotto rispetto ad un sistema che utilizza più macchine che per questo garantisce un miglior sfruttamento dell'energia disponibile, aumentando così l'efficienza del sistema. Quindi non è detto che installare una singola macchina assicuri un costo globale inferiore ad un sistema che utilizza più macchine.

Ogni PAT ha bisogno per essere trascinata di una macchina elettrica, che può essere un semplice motore asincrono oppure una macchina sincrona a secondo della configurazione impiantistica analizzata. Le quantità di macchine sincrone ed asincrone da installare che le

simulazioni restituiscono vengono utilizzate per il calcolo economico. Per individuare le macchine elettriche da accoppiare a quelle idrauliche ci si è basati sulla potenza nominale di queste ultime. Sono state individuate le seguenti macchine sincrone:

| TYJX-132S1 | TYJX-132S2 | TYJX-160S1 | TYJX-200S1 | TYJX-250S1 |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 3000 | 3500€ | 4200€ | 6000 | 9000€ |
| 5,5kW | 11kW | 15kW | 30kW | 55kW |
| 550€/kW | 318€/kW | 280€/kW | 200€/kW | 163€/kW |

per i motori asincroni si è optato per quelli installabili dall'azienda produttrice delle pompe:

| motore per N40-160 | motore per N50-200 |
|--------------------|--------------------|
| 1270€ | 2480€ |
| 5,5kW | 11kW |

Per le configurazioni predisposte con controllo di velocità sono stati scelti i seguenti inverter:

| ADV200 4 -300 | ADV200 5 550 |
|---------------|--------------|
| 2000€ | 3000€ |
| 30kW | 55kW |

In alcune configurazioni il sistema di immagazzinamento dell'energia è basato in parte o totalmente sull'utilizzo di batterie elettrochimiche. Per determinare il costo di queste, data la difficoltà di reperire i prezzi reali dei dispositivi da installare si è cercato in letteratura un costo specifico medio. Il costo dell'energia accumulata in celle elettrochimiche varia a seconda della tecnologia. Per assicurare una buona durata delle batterie si è optato per batterie Li-Ion che garantiscono una maggior affidabilità e tempi di vita maggiori rispetto a quelle più tradizionali basate su tecnologia al piombo. Il costo specifico (c_{bat}) per immagazzinare energia è di circa 450 €/kWh compreso di dispositivi di carica e inverter. Il costo totale del sistema di accumulo elettrochimico è calcolabile semplicemente con la seguente equazione:

$$C_{bat} = E_{bat} \cdot c_{bat}$$

Il modello di dissalatore a osmosi inversa, è piuttosto costoso, ma per garantire la salubrità dell'acqua prodotta è necessario installare un sistema che garantisca una buona qualità dell'acqua. L'impianto per la dissalazione è lo stesso per tutte le configurazioni e il suo costo ammonta a 70.000 euro.

Determinare il costo dell'impianto di accumulo dell'acqua marina è stato indubbiamente la parte più impegnativa dello studio di fattibilità. L'accumulo di monte può essere realizzato tramite uno scavo, dove, dopo aver disteso una membrana impermeabile, viene raccolta l'acqua. Dove il suolo non permette un semplice sbancamento, è necessario costruire muri in cemento armato per contenere l'acqua. Sono state costruite due funzioni di costo per il bacino utilizzando i seguenti costi:

- Sbancamento: $15\text{€}/m^3$
- Membrana impermeabile $20\text{€}/m^2$
- Cemento armato $170\text{€}/m^3$

sono state individuati per entrambe le modalità di realizzazione i seguenti polinomi¹ che in funzione del volume del bacino V_{bac} riportano il costo di realizzazione.

$$C_{bac,1} = V_{bac} (2,1 \cdot 10^{-6} V_{bac}^2 + -0,0144 V_{bac} + 54,5)$$

$$C_{bac,2} = V_{bac} (6,19 \cdot 10^{-7} V_{bac}^2 + -0,0042 V_{bac} + 28,8)$$

Inserendo i dati restituiti dal calcolatore nelle precedenti equazioni si può calcolare il costo totale delle differenti configurazioni impiantistiche. Nel conto economico delle configurazioni con singola o doppia macchina idraulica si è scelto di installarne una aggiuntiva; infatti, mentre nelle configurazioni a più macchine il fuori servizio di una di esse non provoca gravi disservizi, in quella con solo una PAT porterebbe al fermo impianto.

Il conto economico è volto ad individuare la soluzione impianto fotovoltaico-accumulo più economico dato che, l'impianto di dissalazione e quindi il costo non variano con la configurazione. La durata di vita dell'impianto è stata scelta pari a 25 anni. Durante questo periodo alcuni dispositivi, come inverter e batterie devono essere sostituiti. Il tempo di vita delle batterie, degli inverter fotovoltaici e di quelli il controllo delle macchine sincrone è stimato 8 anni. Nel conto economico i costi di sostituzione vengono attualizzate all'anno di investimento, con un tasso di sconto pari al 6%. Le macchine idrauliche non vengono mai sostituite e per semplicità di calcolo, il calo di rendimento dei moduli fotovoltaici non è stato considerato. Fatte queste premesse gli investimenti relativi agli impianti precedentemente descritti sono mostrati qualitativamente nella figura 4.1, in cui sono state raggruppate le voci di costo relative ad ogni sottosistema. Il dettaglio dei costi è consultabile nell'allegato 5.2.

Dal precedente grafico si nota che i costi d'investimento delle soluzioni, escludendo la prima, differiscono in media di qualche migliaio di euro e gli impianti più economici sono i due

¹ I polinomi $C_{bac,1}$ e $C_{bac,2}$ valgono per volumi dell'invaso compresi tra 500 e 3000 m^3

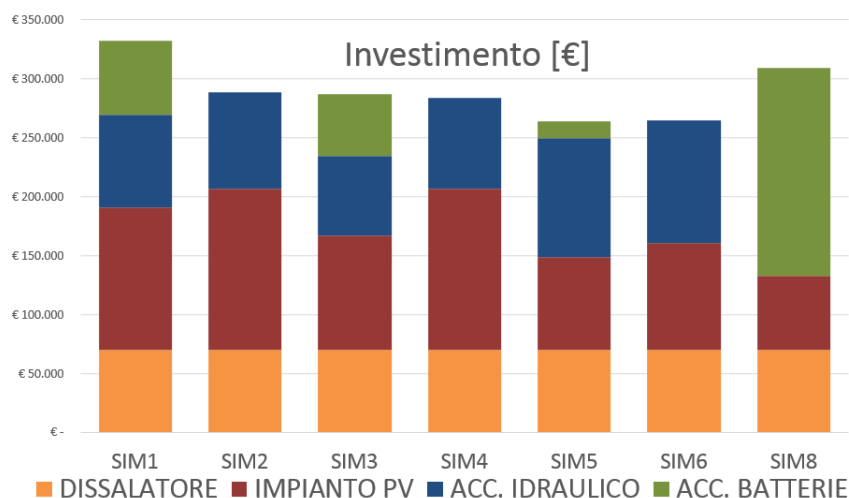


Figura 4.1: Grafico delle voci di costo degli impianti analizzati

che operano con macchine a velocità costante, ovvero le configurazioni 5 e 6. Inoltre la 6 è impiantisticamente molto semplice, non vi è necessità di installare il gruppo batterie e la sua natura modulare la rende più affidabile e versatile nel caso di ampliamento dell'impianto. Si è scelto di approfondire questa soluzione impiantistica al fine di individuare le variabili che ne influenzano il costo finale.

4.1 Ottimizzazione

Analizzando nel dettaglio la soluzione che opera con macchine a velocità costante vengono alla luce alcune relazioni che sono fondamentali al fine di individuare la configurazione migliore. Il rendimento di accumulo $\eta_{G,acc}$ aumenta col rendimento delle pompe utilizzate e diminuisce con la loro potenza nominale, all'aumentare di quest'ultima infatti, cresce l'intervallo temporale tra l'entrata in funzione di una macchina e di quella successiva, incrementando la quantità di energia non sfruttata. Quindi, se da un lato molte macchine a bassa potenza nominale assicurano un maggior rendimento, dall'altro provocano un aumento dei costi del sistema di pompaggio. Inoltre, macchine a potenza nominale ridotta, possono solitamente operare a prevalenze minori e se si vuole immagazzinare la stessa quantità di energia le dimensioni del bacino devono aumentare al diminuire della quota. Le relazioni descritte, influenzando la struttura del sistema, comportano variazione del costo dell'impianto. In breve, il costo dell'impianto fotovoltaico

dipende da

$$\eta_{G,acc} = f\left(\eta_p, \frac{1}{P_n}\right)$$

mentre il costo del bacino dipende da:

$$V = f\left(\frac{1}{h}, \frac{1}{\eta_{G,acc}}\right)$$

in cui,

$$h = f(P_n) \quad \eta_p = f(P_n)$$

Si ha per le stesse variabili una proporzionalità diretta e inversa sul costo totale. Date queste condizioni determinare la configurazione migliore non è certo facile, per questo si è deciso di approfondire le precedenti relazioni in modo da individuare la taglia e il numero di macchine che assicura la condizione di minor costo.

Una qualsiasi ottimizzazione ha bisogno di relazioni che, legando i diversi parametri che determinano la funzione generale, portino ad individuare la condizione migliore. Dall'analisi precedente si nota come le macchine e i loro parametri influenzino il risultato finale perciò partendo dai cataloghi delle pompe precedentemente usate sono state scelte e studiate 13 pompe appartenenti a quattro "serie" differenti. Dai diagrammi a "ventaglio" (vedi allegato 5.1) si nota che, macchine di una stessa serie hanno circa la stessa portata nominale e differiscono per la prevalenza nominale. Per ogni macchina sono state costruite, curva caratteristica e curva di rendimento; dalla prima si deduce la prevalenza nominale (h_n) mentre con la seconda la portata nominale (q_n). Quindi si calcola la potenza nominale (P_n). Ipotizzando che la portata si mantenga costante nelle macchine della stessa serie, si può affermare che la potenza nominale sia funzione solo della prevalenza e si può quindi costruire per ogni serie una funzione che lega $P_n - h_n$, mentre analizzando le curve del rendimento delle pompe si osserva che il massimo decresce con l'aumentare della prevalenza nominale. Come precedentemente si provveduto a individuare una funzione che lega $\eta_{max,P} - h_n$. Inoltre per ogni serie vi sono dei limiti di funzionamento, vengono quindi determinate P_{min} e P_{max} .

Con le equazioni precedenti per un qualsiasi valore di P_n si possono individuare h_n e $\eta_{max,P}$, valori che, influenzando il funzionamento dell'impianto, ne variano il costo. L'ottimizzazione eseguita con l'ausilio di MATLAB si basa su un metodo iterativo che dato un valore di P_n e una quantità di energia (E_{acc}) che si desidera immagazzinare, individua il costo dell'impianto. Per ogni gruppo di macchine il codice divide il range di funzionamento della serie in x intervalli. Per ogni valore di P_n calcola, utilizzando le equazioni precedenti, h_n , $\eta_{max,P}$ e q_n , successivamente

assegna un valore casuale al rendimento di accumulo. Sapendo che

$$E_{acc} = E_{pv} \cdot \eta$$

ricava il valore di energia fotovoltaica, con questo calcola P_{pv} . Ora conoscendo l'andamento temporale della potenza dell'impianto fotovoltaico procede con lo stesso procedimento della simulazione 6 a calcolare la quantità di energia immagazzinata E'_{acc} usano n macchina di potenza P_n . Al termine provvede a calcolarne il rendimento di accumulo definito come:

$$\eta' = \frac{E'_{acc}}{E_{pv}}$$

Il rapporto tra E_{acc} ed E'_{acc} da un indicazione di quanto la dimensione dell'impianto fotovoltaico differisca da quella necessaria:

- per $\frac{E'_{acc}}{E_{acc}} > 1$ l'impianto fotovoltaico è sovradimensionato e il rendimento è minore di quello necessario
- per $\frac{E'_{acc}}{E_{acc}} < 1$ l'impianto fotovoltaico è sottodimensionato e il rendimento è maggiore di quello necessario

quindi è necessario ad aggiustare il rendimento stimato in proporzione alla differenza tra E'_{acc} ed E_{acc} e reiterare ulteriormente finché i due valori non si eguagliano $E'_{acc} \simeq E_{acc}$. Raggiunta questa condizione si calcolano, con i valori di h , P_{pv} , E_{acc} , η ed n il costo dell'impianto fotovoltaico e di pompaggio.

Nell'ottimizzazione, per questioni di semplicità, si è tralasciato di analizzare il sistema nella fase turbinaggio. Questo porta naturalmente ad un dimensionamento non corretto, ma si può ipotizzare che non modifichi sostanzialmente la configurazione del sistema. Quello che invece viene alterata è la reale dimensione dell'impianto fotovoltaico, infatti, questa è calcolata in funzione del solo rendimento di pompaggio e quindi sottodimensionata rispetto alle reali necessità. Se assumiamo che il rendimento di turbinaggio sia equivalente a quello di pompaggio, si può calcolare la quantità di energia fotovoltaica necessaria, e con quella la potenza dell'impianto fotovoltaico necessario a determinare i costi:

$$E'_{pv} = \frac{E_{acc}}{\eta^2}$$

Lo stesso procedimento viene ripetuto per il successivo valore di P_n , creando così, per ogni serie, una relazione tra il costo dell'impianto e la potenza nominale delle macchine idrauliche. La figura 4.2 mostra l'andamento del costo dell'impianto di pompaggio in funzione della potenza

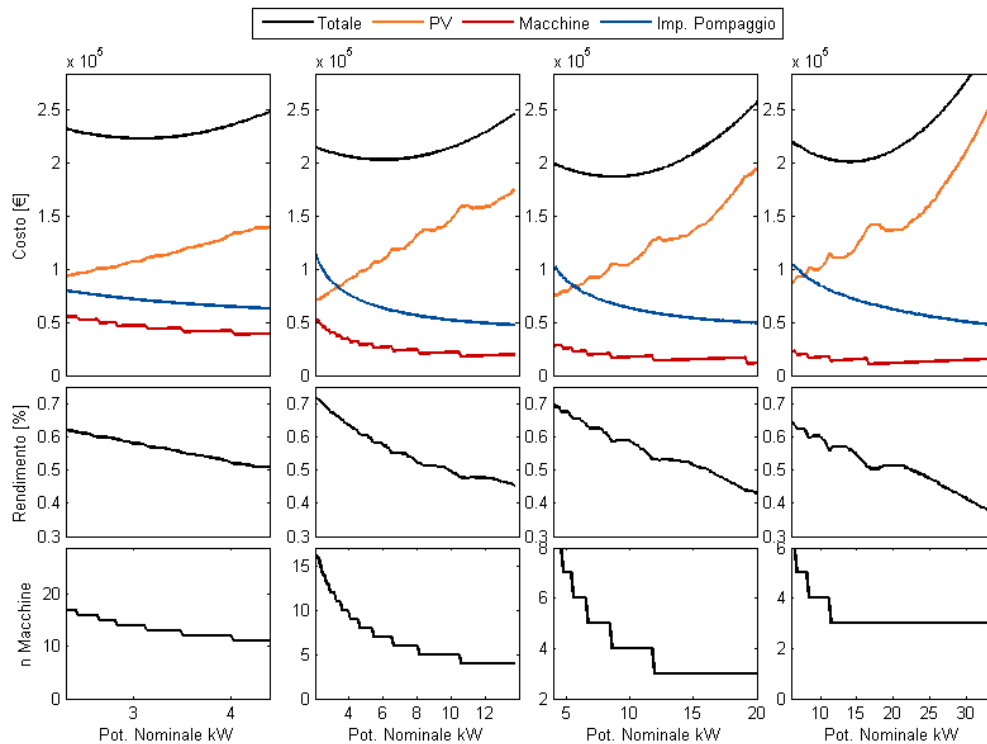


Figura 4.2: Andamento dei costi in funzione di P_n

nominale. Per ogni serie si può individuare un costo minimo (C_{min}). Comparandolo si individua quale serie e quale taglia è migliore per quel dato valore di E_{acc} .

Successivamente si è scelto di verificare il costo specifico al variare dell'energia accumulata. Mantenendo il codice precedentemente elaborato si è aggiunto un ciclo che elabora dei valori di E_{acc} via via crescenti e ne ricava la configurazione a costo minimo. Per poter confrontare i vari risultati è necessario valutare il costo in relazione all'energia accumulata, ovvero il costo specifico:

$$c_{min} = \frac{C_{min}}{E_{acc}} [\text{€/kWh}]$$

Coi dati raccolti è possibile costruire il grafico $c_{min} - E_{acc}$ in figura 4.3, in cui si nota chiaramente l'effetto scala. Infatti per tutte e quattro le serie all'aumentare delle dimensioni il costo per kWh accumulato diminuisce. Inoltre ci si accorge che vi è in quasi tutto il campo di valutazione una serie che è "migliore" delle altre che assicura una maggior economicità lungo tutto il range di potenza analizzato. Quindi la serie preferibile è la 50, ovvero quella che si

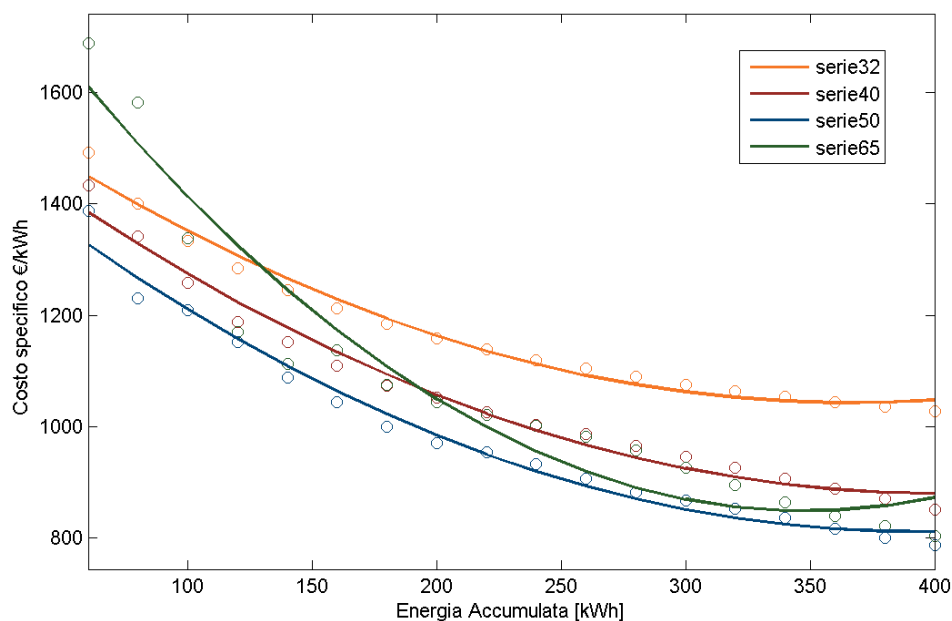


Figura 4.3: Andamento del costo specifico in funzione dell'energia accumulata

colloca in un range intermedio di potenza nominale. Questo può esser dovuto al giusto rapporto tra una buona prevalenza erogabile e una potenza nominale non eccessiva. La prima assicura maggiori altezze e quindi minori dimensioni del bacino e probabilmente, la seconda caratteristica permette di utilizzare un minor numero di macchine necessarie anche se questo, causando un decremento del rendimento, provoca un aumento delle dimensioni, e quindi del costo, dell'impianto fotovoltaico.

Tornando all'obiettivo di individuare la soluzione più economica, fornendo al codice la quantità di energia che si vuole immagazzinare questo restituisce potenza nominale e altezza del bacino a cui conviene installarlo. Naturalmente l'altezza del bacino ideale va conciliata con la morfologia del luogo quindi ogni risultato deve essere valutato caso per caso. La tabella seguente mostra le condizioni migliori per ogni serie quando si voglia accumulare 190kWh. La scelta ricade indubbiamente sulle macchine della serie 50.

| | Serie 32 | Serie 40 | Serie 50 | Serie 65 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| P_n [kW] | 3,1 | 6 | 8,7 | 14 |
| h_n [m] | 37 | 46 | 41 | 35 |
| n | 14 | 7 | 4 | 3 |
| C_{min} [k€] | 220 | 202 | 186 | 200 |

Non essendo disponibili macchine di qualsivoglia potenza e prevalenza bisogna scegliere la macchina reale che più si avvicina alle condizioni restituire dal codice.

Dal catalogo le due macchine che più si avvicinano alla potenza di 8,7kW sono la N 50-160A/A e la N 50-200A/A. La prima delle due non è però in grado di fornire la prevalenza necessaria di 41m, quindi si opta per la seconda. Individuata la pompa, si valuta come per la configurazione 6 il comportamento del sistema al fine di ottenere i parametri che lo caratterizzano e che ne determinano il costo.

4.2 Verifica dei risultati di ottimizzazione

Come eseguito precedentemente si procede alla simulazione. La pompa scelta è di potenza maggiore rispetto a quella ideale, e il suo BEP si verifica in condizioni che si scostano leggermente da quelle fornite dal calcolatore. È però doveroso, al fine di garantire il miglior rendimento, far operare la macchina alle condizioni nominali:

$$h_n = 50 \text{ m} \quad q_n = 13,8 \text{ l/s}$$

Dalla simulazione mostrata in figura 4.4 si può osservare lo stesso funzionamento a gradini della 6. Come prima anche in questo caso il numero di generatori può essere ridotto rispetto al numero di macchine idraulica a causa delle differenti potenze in accumulo e produzione. Nello specifico, tre devono essere macchine sincrone mentre una può essere asincrona. Questo risultato conferma quello restituito dall'ottimizzazione.

Come per le simulazioni precedente i dati restituiti dal calcolatore sono raccolti in tabella 4.1 e vengono utilizzati per il calcolo del costo dell'impianto. A differenza della simulazione 6 il minor rendimento dovuto all'utilizzo di macchina a potenza nominale maggiore impone una maggior superficie fotovoltaica, mentre la maggior altezza del bacino contribuisce a ridurre i costi. Se confrontiamo solo i costi dell'impianto fotovoltaico e di quello di accumulo si osserva come questi siano in prima approssimazione inversamente proporzionali. Nella figura 4.5, si può infatti osservare che i costi dei due impianti sono quasi invertiti. In una soluzione il bacino costa più dell'impianto fotovoltaico, nell'altra è il contrario.

La configurazione ottimizzata è un compromesso tra la configurazioni 3 e 6. Presenta infatti alcuni vantaggi della 6 tra cui un buon rendimento e una maggior semplicità operativa grazie all'assenza dell'inverter e della batteria. La modularità permette che il sistema continua a lavorare anche in caso di malfunzionamento di una delle macchine. Inoltre racco anche i vantaggi della 3, tra cui l'altezza del bacino che permette una minor dimensione dell'invaso e il ridotto numero di macchine.

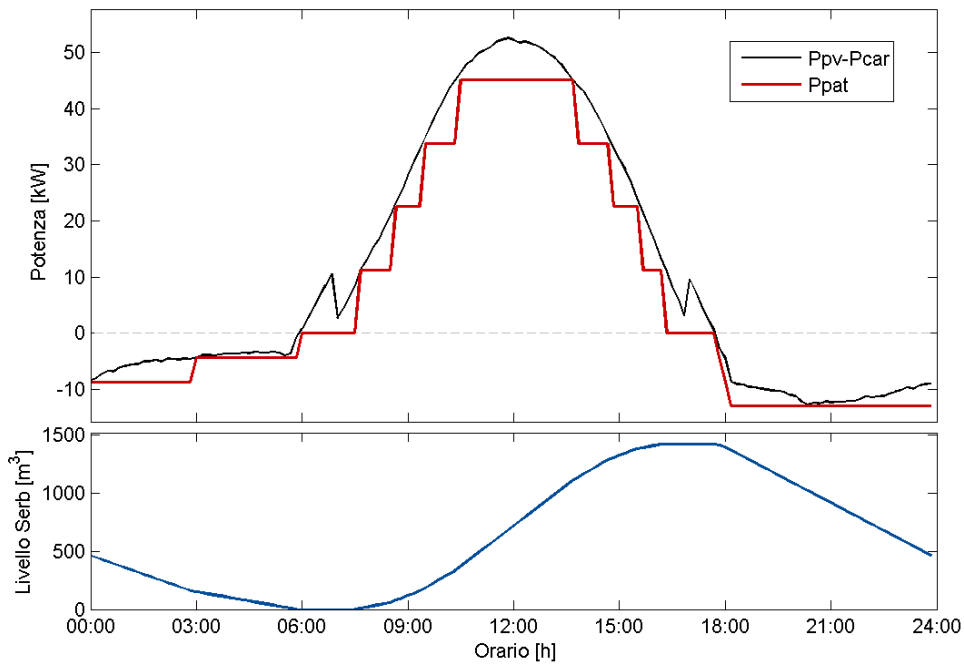


Figura 4.4: Simulazione della configurazione 7

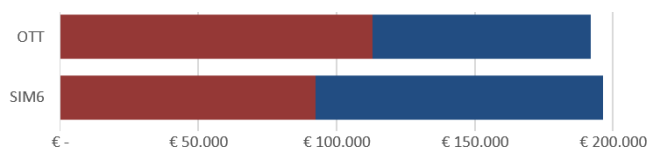


Figura 4.5: Dettaglio costi della configurazione 6 e di quella ottimizzata

Con i dati raccolti si procede a determinare il costo dell'impianto che ammonta a 260.000 € che anche se di poco, comunque più economico alla configurazione 6. Questo risultato se vi si sottrae il costo del dissalatore, pari a 70.000 € conferma il valore restituito dell'ottimizzazione con un errore di circa 4.000 €. Perciò si possono ritenere valide le assunzioni eseguite precedentemente, e optare per un impianto di questo tipo a macchine a velocità fissa.

| | |
|-----------------|-------|
| $\eta_{G,acc}$ | 0,273 |
| $P_{PV} [kW]$ | 69,2 |
| $V_{bac} [m^3]$ | 1416 |

Tabella 4.1: Risultati

Per valutare la fattibilità di un progetto simile è necessario un piano economico d'investimento, che attualizzando esborsi e ricavi dia una stima del guadagno e del tempo di ritorno dell'investimento. A differenza di un piano d'investimento classico in questo caso lo scopo è garantire l'accesso alle risorse e non il ritorno economico. Perciò si può ipotizzare che il progetto

sia finanziato dalla comunità locale. La partecipazione dei cittadini alle scelte e all'investimento porta le persone ad un maggior coscienza verso le questioni importanti del territorio in cui si vive, inoltre la costruzione di un sistema abientalmente sostenibile e partecipato rinforza i legami sociali e il senso di appartenenza alla comunità. Ciò che conta non è quindi il tempo di ritorno dell'investimento o i guadagni ma la possibilità di aver acqua potabile ed energia elettrica a costi accessibili per la popolazione.

Il sistema di dissalazione può avere tempi di ritorno anche più lunghi di quelli normalmente accettati. Se la durata dell'impianto è di 25-30 anni si può ipotizzare un tempo di rientro di 15-20 anni, accettabile per investimenti nella costruzione di impianti e servizi. Su questa base si possono stabilire i prezzi di acqua ed energia elettrica.

Si può ipotizzare che l'investimento sia finanziato per il primi quattro anni con una quota fissa per ogni famiglia e una quota al consumo mentre successivamente solo con una quota proporzionale ai consumi.

Attualizzando i costi e ricavi con un tasso del 6%, ipotizzando una manutenzione pari al 20% dei guadagni annui e tenendo in considerazione la sostituzione degli inverter fotovoltaici. Se scegliamo di vendere l'acqua ed energia elettrica rispettivamente ad 1 €/m³ e 0,25€/kWh,

$$VAN = I - \frac{(1+a)^n - 1}{a(1+a)^n} (c_{H_2O} \cdot Q_{H_2O} + c_{kWh} \cdot E) (1 - 0,2)$$

per $n = 17$ il VAN diventa positivo, ciò significa che in questo tempo l'investimento è stato ammortizzato.

Per mantenere prezzi accessibili alla comunità è quindi necessario che il tempo di ritorno dell'investimento sia piuttosto lungo, fatto che può essere accettato se il fine non è il solo guadagnare ma è in primis portare un servizio indispensabile come la fornitura di acqua potabile.

Capitolo 5

Considerazioni e Conclusioni

Durante il lavoro di tesi ho dovuto affrontare diverse questioni interdisciplinari. Inizialmente infatti l'idea era limitata alla dissalazione solare quindi ci si è concentrati sulle tecnologie e sui problemi legati alla scarsità idrica. Quando poi il progetto è stato ampliato includendo il sistema di accumulo questo è diventato la parte centrale della tesi e ha ampliato molto la quantità di sottosistemi di natura differente da approfondire e studiare. Successivamente si è passati ad altre materie quando si è svolta l'ottimizzazione in MATLAB e la valutazione economica di fattibilità.

Il dimensionamento degli impianti è stato eseguito considerando solo ventiquattro ore e usato come dati di irraggiamento quelli del mese di Aprile, questo come già detto porta a dei limiti nell'autonomia energetica. Nel caso di prolungato maltempo si ha assenza quasi totale di energia elettrica, in questo caso è auspicabile che le utenze elettriche vengano interrotte e l'energia accumulata utilizzata solo per la produzione di acqua. È però vero che durante i periodi di maltempo la quantità di acqua richiesta è minore, quindi se la situazione è ben gestita dalla comunità l'inconveniente può essere superato facilmente. Un sovradimensionamento dei sistemi per aumentare l'autonomia porterebbe ad un aumento rilevante dei costi; nell'ottica del progetto si è preferito avvantaggiare l'economicità accettando la possibilità di brevi fuori servizio. L'aver dimensionato i sistemi basandosi sul mese di Aprile non comporta in prima approssimazione grandi inconvenienti. Durante l'inverno l'irraggiamento sarà minore così come le necessità di acqua, d'estate invece il surplus di energia può dissalare una quantità maggiore di acqua.

L'impianto di pompaggio è per molti aspetti la parte che è stata maggiormente approfondita. L'accumulo idroelettrico dell'energia è la tecnologia di stoccaggio più matura, pochi però sono gli impianti che sfruttano come bacino di valle il mare, l'assenza di opere civili per la sua costruzione rendono interessante questa scelta. Altra questione è il bacino di monte che dev'essere costruito attraverso opere di contenimento oppure sbancando quando possibile. Interessante

è il caso dell'isola spagnola di El Hierro in cui l'energia prodotta da pale eoliche è accumulata pompando acqua di mare. Chiaramente la costruzione dell'invaso di monte e la sua altezza d'installazione dipendono dalle condizioni geologiche del sito, perciò queste scelte vanno prese valutando caso per caso. L'ottimizzazione precedente individua infatti, per ogni taglia, una prevalenza geodetica consigliata, questa è da ritenersi un aiuto alla scelta e va mediata con le possibilità morfologiche del territorio.

L'utilizzo della PAT come sistema di accumulo al posto di una turbina potrebbe sembrare inopportuna. Utilizzare una turbina reversibile assicura indubbiamente un rendimento maggior ed un range di funzionamento più esteso. Queste però sono difficilmente reperibili per taglie di pochi kW e sono spesso costose, l'utilizzo di PAT assicura a scapito del rendimento, una maggior economicità dell'impianto. Quando si usano Pump ad Turbine le condizioni di lavoro all'efficienza massima cambiano con la modalità di funzionamento. Il dimensionamento delle macchine deve essere però fatto sulle condizioni di pompaggio in modo che la macchina idraulica sia in grado di fornire la prevalenza necessaria ad accumulare acqua nel bacino di monte. Ciò provoca un aumento delle maggiori inefficienze quando la pompa opera come turbina. Per aumentare il rendimento dell'impianto si potrebbero usare differenti macchine per pompaggio e turbinaggio, in modo da poterle dimensionare per le condizioni ottimali. Questo provocherebbe però un aumento del numero di macchine da utilizzare con un incremento dei costi. Oppure addirittura usare una turbina per la produzione ed un gruppo di pompe per l'accumulo. È evidente come ulteriori approfondimenti di questo sottosistema sono necessari e vanno affrontati in funzione dei vincoli di progetto; è probabile che con l'incremento delle taglie e dei carichi idrici ed elettrici l'utilizzo di una turbina francis inizi ad esser giustificata.

Molte delle scelte effettuate durante il progetto sono state determinate dalla situazione di isolamento della rete. Ciò influenza notevolmente la logica di funzionamento dell'impianto di pompaggio. Tradizionalmente gli impianti idroelettrici con accumulo operano in pompaggio di notte e in produzione durante i picchi della rete. In questo caso però la situazione è invertita: di giorno si accumula, di notte si produce. La rete ad isola impone che i flussi di potenza siano sempre equilibrati e che il carico sia sempre soddisfatto sollecitando il sistema a operare a valori di potenza molto differenti. Anche per questo motivo la scelta è ricaduta su un sistema modulare in grado di adattarsi meglio al carico richiesto o disponibile.

L'impianto di pompaggio può con piccole modifiche essere ampliato per accumulare maggiori quantità di energia, perciò in caso di futuro allacciamento l'impianto diventerebbe fulcro centrale della rete elettrica in modo da sfruttare in modo migliore le fonti di energia rinnovabile presenti sul territorio. In un ottica di mercato l'accumulo una volta connesso può, acquistando e vendendo energia nei momenti necessari, generare importanti benefici economici.

Il piano d'investimento ipotizzato ha un tempo di ritorno e dei prezzi di vendita accettabili per impianti di servizio in realtà rurali. Se il dimensionamento si fosse basato su consumi di paesi 'occidentali' taglie e costi d'investimento sarebbero cresciuti notevolmente con un allungamento

dei tempi di ammortamento e un inevitabile aumento del prezzo di vendita.

Un ulteriore parametro che influenza l'investimento iniziale è l'esborso per la costruzione dell'invaso. La funzione per determinarne il costo è stata stimata e varia in funzione del tipo di bacino che si può costruire. Ciò comporta un'incertezza nel calcolo economico quindi è opportuno che prima della progettazione si individui per il sito d'interesse il costo per le opere d'invaso, perché se il costo fosse troppo elevato bisognerebbe valutare la possibilità di un accumulo elettrochimico. Per diminuire le possibilità che la soluzione ad accumulo prevalesse troppo su quella a batterie si è deciso di utilizzare tra le due funzioni quella più costosa. Stimando in modo migliore la funzione di costo sarebbe opportuno identificare una dimensione minima che giustifichi la realizzazione dell'invaso.

Opere simili sono state effettuate anche a Finnentrop-Rönkhausen in Germania quando nel 1969 è stato realizzato un vaso di 1,3 milioni di metri cubi di acqua per l'accumulo energetico. Recentemente l'aumento delle centrali ad energia rinnovabile sta spingendo lo sviluppo di nuovi sistemi di accumulo, in linea di massima però le tecnologie più mature sono l'accumulo elettrochimico e lo stoccaggio idrico in relazione alle possibilità e alla quantità di energia che si vuole accumulare.

Impianti di accumulo idroelettrico dell'energia così piccoli sono ad oggi poco studiati, quindi ulteriori approfondimenti soprattutto per sistemi che utilizzano PAT sono necessari. Ad ogni modo impianti di questo genere se associati ad energie rinnovabili in reti off-grid o connessi alla rete elettrica, quindi con la possibilità di effettuare servizi di peak shaving, possono in alcune circostanze giustificarsi anche per dimensioni relativamente piccole.

Bibliografia

- [1] A. Massarutto, L'acqua. Il Mulino, 2008.
- [2] P. Wu, N. Christidis, and P. Stott, "Anthropogenic impact on Earth's hydrological cycle," Nat. Clim. Chang., vol. 3, no. 9, pp. 807–810, 2013.
- [3] A. Mazzarella and A. Fortelli, Elementi di meteorologia e climatologia. Aracne, 2011.
- [4] Managing Water Under Uncertainty and Risk: United Nations World Water Development Report #4 (3 Vols.).
- [5] [1] L. Sorbini, Geologia, idrogeologia e qualità dei principali acquiferi Veronesi, no. v. 3–5. Museo civico di storia naturale di Verona, 1993.
- [6] DrinkingWater Equity, safety and sustainability - JMP Thematic Report on Drinking Water 2011. UNICEF and World Health Organization 2011
- [7] M. Rognoni, La dissalazione dell'acqua di mare. Descrizione, analisi e valutazione delle principali tecnologie. Flaccovio Dario, 2010.
- [8] A. Cipollina, G. Micale, and L. Rizzuti, Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. Springer, 2009.
- [9] L. K. Wang, J. P. Chen, Y. T. Hung, and N. K. Shamma, Membrane and Desalination Technologies. Humana Press, 2010.
- [10] Energy Recovery Inc . Highly Efficient Energy Recovery Devices. September 2011.
- [11] Zhou Yihui, Bi Mingshu and Liu Yu. Rotary Pressure Exchanger for SWRO. School of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, China, 2011.
- [12] Bryan Christie, Get the Salt Out. National Geographic. March 15, 2010
- [13] Italian Annual Climate Report 2012. Air Force Weather Service. Italy 2012.

- [14] Global irradiation at optimally inclined surface atlas. PV-GIS v2, JRC - Joint Research Center, 2011
- [15] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "Feasibility study and economic analysis of pumped hydro storage and battery storage for a renewable energy powered island," *Energy Convers. Manag.*, vol. 79, no. 0, pp. 387–397, 2014.
- [16] J. P. MacHarg, "Retro-fitting existing SWRO systems with a new energy recovery device," *Desalination*, vol. 153, no. 1–3, pp. 253–264, 2003.
- [17] A. Valbjørn, "ERD for small SWRO plants". *Desalination*, vol. 248, no. 1–3, pp. 636–641, 2009.
- [18] A. Williams, *Pumps as turbines: a user's guide*. ITDG Pub., 2003.
- [19] D. A. Katsaprakakis, D. G. Christakis, A. Zervos, D. Papantonis, and S. Voutsinas, "Pumped storage systems introduction in isolated power production systems," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 467–490, 2008.
- [20] eERG, end-use Efficiency Research Group - Dipartimento di Energetica Politecnico di Milano. MICENE Misure dei Consumi di ENergia Elettrica in 110 abitazioni Italiane - Curve di carico dei principali elettrodomestici e degli apparecchi di illuminazione. Milano, 2004.
- [21] A. Bianchi and U. Sanfilippo, *Pompe e impianti di sollevamento*. Hoepli, 2001.
- [22] E. H. Insti, *Variable Speed Pumping: A Guide to Successful Applications*. Elsevier Science, 2004.
- [23] S. Derakhshan and A. Nourbakhsh, "Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 32, no. 3, pp. 800–807, 2008.
- [24] Massimo Ceraolo, Università degli studi di Pisa - Sistemi di accumulo elettrochimico. Ottobre 2012
- [25] D. Neves, C. A. Silva, and S. Connors, "Design and implementation of hybrid renewable energy systems on micro-communities: A review on case studies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, no. 0, pp. 935–946, 2014.

Allegati

| | Soluzione impiantistica | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| $\eta_{G,acc}$ | 0,24 | 0,20 | 0,33 | 0,18 | 0,49 | 0,383 | 0,81 |
| P_{PV} [kW] | 75,5 | 85,5 | 61,7 | 92,3 | 49,5 | 56,5 | 39,7 |
| V_{bac} [m ³] | 1120 | 1110 | 764 | 1073 | 1830 | 2023 | - |
| h_{bac} [m ³] | 70 | 70 | 70 | 70 | 30 | 30 | - |
| E_{bat} [kWh] | 69,3 | - | 57,8 | - | 16,2 | - | 193,8 |
| n_{PAT} | 1 | 1 | 2 | 2 | 12 | 13 | - |
| n_{sinc} | 1 | 1 | 1 | 2 | 8 | 8 | - |
| n_{asinc} | - | - | - | - | 4 | 5 | - |
| $n_{inv,PAT}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - |

Tabella 5.1: Confronto numerico dati ottenuti dalle simulazioni

| | Composizione dei costi | | | | | Totale |
|----------------|------------------------|-----------|----------|-------------|----|--------|
| | Impianto PV | Pompaggio | Batterie | Dissalatore | | |
| Configurazione | 1 | 120,7 | 78,8 | 62,9 | 70 | 332,6 |
| | 2 | 136,7 | 81,6 | - | 70 | 288,4 |
| | 3 | 96,9 | 67,5 | 52,5 | 70 | 286,9 |
| | 4 | 136,7 | 77,2 | - | 70 | 283,9 |
| | 5 | 79,2 | 100,2 | 14,7 | 70 | 264,1 |
| | 6 | 90,5 | 103,8 | - | 70 | 264,4 |
| | 7 | 62,7 | - | 176,3 | 70 | 308,9 |
| | OTT | 110,7 | 79 | - | 70 | 259,7 |

Tabella 5.2: Costo di investimento attualizzato per ogni configurazione

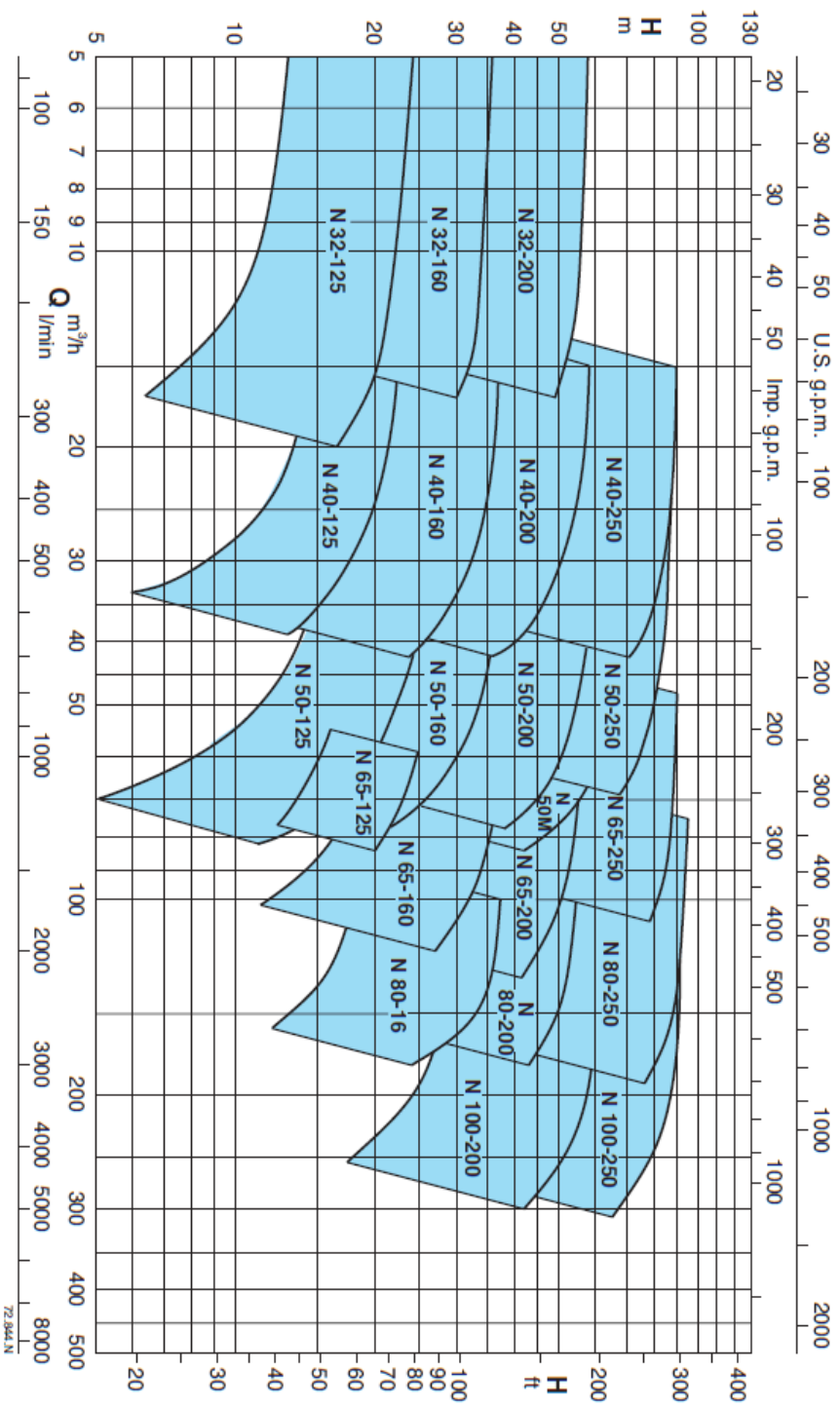


Figura 5.1 : Grafico a ventaglio delle pompe utilizzate - CALPEDA serie N

| POMPA | POMPA | MOTORE | P ₂ kW | Q | | 6,6 | 7,5 | 8,4 | 9,6 | 10,8 | 12 | 13,2 | 15 | 16,8 | 18,9 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 37,8 | 39 | 42 | 45 | 48 | |
|---------------|-------------|---------|----------------------|-------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|-----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|--|
| | | | | m ³ /h | l/min | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-125F/A | N 32-125F/A | 71 B2 | 0,55 | 12,5 | 12 | 11,5 | 11 | 10,5 | 9,5 | 8 | 6* | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-125D/A | N 32-125D/A | 80 A2 | 0,75 | 0,4 | 0,43 | 0,46 | 0,48 | 0,5 | 0,52 | 0,54 | 0,55 | 0,56 | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-125A/A | N 32-125A/A | 80 B2 | 1,1 | 18 | 17,5 | 17 | 16,5 | 16 | 15,5 | 14 | 12,5* | 11* | 8,5* | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-125S/A | N 32-125S/A | 90 S2 | 1,5 | 0,63 | 0,67 | 0,7 | 0,75 | 0,79 | 0,83 | 0,86 | 0,9 | 0,93 | 0,95 | 0,97 | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-125S/A | N 32-125S/A | 90 S2 | 1,5 | 0,83 | 0,87 | 0,91 | 0,96 | 1,01 | 1,06 | 1,1 | 1,19 | 1,26 | 1,31 | 1,35 | 1,38 | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-125S/A | N 32-125S/A | 90 S2 | 1,5 | 0,86 | 0,9 | 0,94 | 1 | 1,06 | 1,12 | 1,17 | 1,25 | 1,3 | 1,36 | 1,42 | 1,49 | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-160B/A | N 32-160B/A | 90 S2 | 1,5 | 29,5 | 29 | 28,5 | 27,5 | 27 | 26 | 25* | 22,5* | 20* | 17,5* | 12,5* | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-160A/A | N 32-160A/A | 90 L2 | 2,2 | 1,1 | 1,17 | 1,23 | 1,30 | 1,37 | 1,43 | 1,48 | 1,55 | 1,63 | 1,7 | 1,75 | 1,79 | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-160A/A | N 32-160A/A | 90 L2 | 2,2 | 35,5 | 35,5 | 35 | 34,5 | 34 | 33,5 | 33 | 32* | 30* | 28* | 25* | 21* | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-200D/A | N 32-200D/A | 100 L2 | 3 | 1,56 | 1,64 | 1,71 | 1,81 | 1,9 | 1,98 | 2,05 | 2,16 | 2,24 | 2,33 | 2,4 | 2,47 | 2,5 | | | | | | | | | | |
| B-N 32-200D/A | N 32-200D/A | 100 L2 | 2,2 | 37,5 | 37 | 36 | 35 | 34 | 33 | 32 | 30 | 27* | 22* | 22* | 22* | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-200D/A | N 32-200D/A | 100 L2 | 3 | 1,92 | 2 | 2,06 | 2,17 | 2,24 | 2,3 | 2,35 | 2,4 | 2,45 | 2,5 | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-200C/A | N 32-200C/A | 100 L2 | 3 | 44,5 | 44 | 43,5 | 43 | 42 | 41 | 40 | 38,5 | 36* | 32* | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-200A/A | N 32-200A/A | 112 M2 | 4 | 2,17 | 2,28 | 2,36 | 2,5 | 2,63 | 2,74 | 2,83 | 2,97 | 3,1 | 3,2 | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 32-200A/A | N 32-200A/A | 132 SA2 | 5,5 | 57 | 56,5 | 56 | 55,5 | 54,5 | 53,5 | 52,5 | 51 | 49* | 46* | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-125F/A | N 40-125F/A | 80 B2 | 1,1 | 2,9 | 3,1 | 3,18 | 3,35 | 3,51 | 3,67 | 3,8 | 4 | 4,2 | 4,4 | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-125C/A | N 40-125C/A | 90 S2 | 1,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-125C/A | N 40-125C/A | 90 L2 | 2,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-125A/A | N 40-125A/A | 90 L2 | 2,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-160C/A | N 40-160C/A | 90 L2 | 2,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-160B/A | N 40-160B/A | 100 L2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-160A/A | N 40-160A/A | 112 M2 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-160A/A | N 40-160A/A | 132 SA2 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-200D/A | N 40-200D/A | 112 M2 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-200D/A | N 40-200D/A | 132 SA2 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-200C/A | N 40-200C/A | 112 M2 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-200C/A | N 40-200C/A | 132 SA2 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-200B/A | N 40-200B/A | 132 SA2 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-200A/A | N 40-200A/A | 132 SB2 | 7,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-200A/A | N 40-200A/A | 132 SB2 | 7,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-250C/A | N 40-250C/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-250B/A | N 40-250B/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 40-250A/A | N 40-250A/A | 160 MB2 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

P₂ Potenza nominale motore. P₃ Potenza assorbita dalla pompa. H Prevalenza totale in m. * Altezza di aspirazione massima 1-2 m.

Figura 5.2: Dati caratteristiche pompe delle serie 32 e 40

| POMPA B-N | POMPA N | MOTORE | P ₂ KW | Q m ³ /h Q l/min | 24 | 27 | 30 | 33 | 37,8 | 42 | 48 | 54 | 60 | 66 | 69 | 72 | 75 | 78 | 81 | 84 | 84 | 132 | 150 |
|---------------|-------------|---------|----------------------|--------------------------------|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-125F/A | N 50-125F/A | 90 L2 | 2,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-125D/A | N 50-125D/A | 100 L2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-125A/A | N 50-125A/A | 112 M2 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-125S/A | N 50-125S/A | 132 SA2 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-160B/A | N 50-160B/A | 132 SA2 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-160A/A | N 50-160A/A | 132 SB2 | 7,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-200B/A | N 50-200B/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-200A/A | N 50-200A/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-200S/A | N 50-200S/A | 160 MB2 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-250C/A | N 50-250C/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-250B/A | N 50-250B/A | 160 MB2 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-250A/A | N 50-250A/A | 160 L2 | 18,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50-250S/A | N 50-250S/A | 180 M2 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50M/E/A | N 50M/E/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50M/D/A | N 50M/D/A | 160 MB2 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 50M/C/A | N 50M/C/A | 160 L2 | 18,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| POMPA B-N | POMPA N | MOTORE | P ₂ KW | Q m ³ /h Q l/min | 24 | 27 | 30 | 33 | 37,8 | 42 | 48 | 54 | 60 | 66 | 69 | 72 | 75 | 78 | 81 | 84 | 84 | 132 | 150 |
| B-N 65-125E/A | N 65-125E/A | 112 M2 | 4 | 400 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-125C/A | N 65-125C/A | 132 SA2 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-125A/A | N 65-125A/A | 132 SB2 | 7,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-160E/A | N 65-160E/A | 132 SA2 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-160D/A | N 65-160D/A | 132 SB2 | 7,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-160C/A | N 65-160C/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-160B/A | N 65-160B/A | 160 MA2 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-160A/A | N 65-160A/A | 160 MB2 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-200C/A | N 65-200C/A | 160 MB2 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-200B/A | N 65-200B/A | 160 L2 | 18,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-200A/A | N 65-200A/A | 180 M2 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-250C | N 65-250C | 180 M2 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-250B | N 65-250B | 200 L2 | 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-N 65-250A | N 65-250A | 200 LB2 | 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

N Esecuzione normale.
B-N Esecuzione in bronzo.

P₂ Potenza nominale motore.
P₃ Potenza assorbita dalla pompa.

H Prevalenza totale in m.
* Altezza di aspirazione massima 1-2 m.

° Battente positivo minimo 1 m.

Figura 5.3: Dati caratteristiche pompe delle serie 50 e 65